

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

L'ÉTUDE DES CHANGEMENTS APPRÉHENDÉS DES PRÉCIPITATIONS
EXTRÊMES SUR LA PROVINCE DU QUÉBEC EN UTILISANT UN
ENSEMBLE DE MULTI-MRC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

PAR
ANDRÉ MONETTE

JUIN 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier ma directrice de recherche, Mme. Laxmi Sushama, pour son dévouement et son encadrement durant ce projet. Je voudrais aussi souligner la contribution substantielle de mon co-directeur de recherche, Naveed Khaliq, pour sa précieuse expertise sur la méthode statistique de ce projet. Évidemment, sans l'appui financier du projet RDC, du CRSNG, d'Hydro-Québec et d'OURANOS, et des simulations du projet NARCCAP, ce projet n'aurait pu existé. Finalement, je voudrais remercier mes collègues à l'UQÀM pour leur aide et support, particulièrement Bratislav Mladjic et Debasish Pai Mazumder.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ACRONYMES	xv
LISTE DES SYMBOLES	x
RÉSUMÉ	xi
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE II	
PROJECTED CHANGES TO PRECIPITATION EXTREMES FOR NORTHEAST CANADIAN WATERSHEDS USING A MULTI-RCM ENSEMBLE	11
Abstract.....	12
2.1. Introduction.....	13
2.2. Simulations and observations	15
2.2.1. NARCCAP simulations.....	15
2.2.2 Observed data.....	16
2.3. Methodology.....	17
2.3.1. Reference grid.....	17
2.3.2. Precipitation characteristics and their estimation.....	17
2.3.3. Performance and lateral boundary forcing errors.....	19
2.3.4. Structural and AOGCM related uncertainties	19
2.3.5. Projected changes	20

2.4. Results.....	21
2.4.1. Statistical homogeneity analysis.....	21
2.4.2. Performance and boundary forcing errors	22
2.4.3. RCMs structural and AOGCM related uncertainties	24
2.4.4. Projected changes	25
2.5. Summary and conclusions	27
Acknowledgements.....	29
FIGURES.....	30
TABLEAUX.....	43
CHAPITRE III	
CONCLUSION.....	47
ANNEXE A	
FIGURES SUPPLÉMENTAIRES N'AYANT PAS ÉTÉ PRÉSENTÉES DANS L'ARTICLE, MAIS DISCUTÉES DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT	53
ANNEXE B	
TABLEAUX SUPPLÉMENTAIRES N'AYANT PAS ÉTÉ PRÉSENTÉS DANS L'ARTICLE, MAIS DISCUTÉS DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT	67
RÉFÉRENCES	69

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Study region with its 21 watersheds (see Table 2 for details) overlaid with the reference grid. The domain of gridded observed daily precipitation data is shown in green. The inset shows the location of the study region in North America.....	31
2.2	Observed regional return levels (in mm) of 10-, 30- and 50-yr return period for 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for the reference 1980–2000 period for 14 of the 21 watersheds.	32
2.3	Relative difference between $Q_{(1,10)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.....	33
2.4	Relative difference between $Q(7,50)$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.	34
2.5	Scatter plots of 10- (red), 30- (blue) and 50-yr (green) return levels (in mm) of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for the 1980–2000 period. X-axis corresponds to NCEP driven RCM simulation, while y-axis corresponds to AOGCM driven simulation. Numbers in each panel represent average percentage difference between NCEP and AOGCM driven simulations.	35
2.6	Coefficient of variation of NCEP-driven RCM simulations for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.	36

2.7	Ensemble averaged projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period.	37
2.8	Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7- day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CCSM.....	38
2.9	Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7- day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CGCM3.	39
2.10	Coefficient of variation of projected changes to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes based on the multi-RCM ensemble. Blue (red) dots are used for watersheds with positive (negative) projected ensemble averaged changes.	40
2.11	Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 5% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.	41
2.12	Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 10% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.	42
A.1	Number of extreme precipitation duration cases, out of six (i.e. 1-, 2-, 3-, 5-, 7-, and 10-day precipitation extremes), for which a basin is found homogeneous using the observed data. Same information for the case of six RCM_NCEP simulations is shown in brackets.	54

A.2	Observed regional return levels (in mm) of 10-, 30- and 50-yr return period for 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for the reference 1980–2000 period for 14 of the 21 watersheds.....	55
A.3	Relative difference between $Q_{(2,10)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.....	56
A.4	Relative difference between $Q_{(10,50)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.....	57
A.5	Scatter plots of 10- (red), 30- (blue) and 50-yr (green) return levels (in mm) of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for the 1980–2000 period. X-axis corresponds to NCEP driven RCM simulation, while y-axis corresponds to AOGCM driven simulation. Numbers in each panel represent average percentage difference between NCEP and AOGCM driven simulations.	58
A.6	Coefficient of variation of NCEP-driven RCM simulations for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.	59
A.7	Ensemble averaged projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period.	60
A.8	Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CCSM.....	61

A.9	Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CGCM3.....	62
A.10	Coefficient of variation of projected changes to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes based on the multi-RCM ensemble. Blue (red) dots are used for watersheds with positive (negative) projected ensemble averaged changes.	63
A.11	Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 5% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.	64
A.12	Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 10% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.	65

LISTE DES TABLEAUX

Table	Page
2.1 Names and acronyms of six NARCCAP RCMs and details of AOGCM driven RCM simulations considered in this study.	44
2.2 Description of the 21 watersheds used in the study.....	45
2.3 Percentage of stastically significant changes for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3-, and 7-day precipitation extremes at the 95% level (90% level in parenthesis).	46
B.1 Best fitting rank of the five distributions using observed dataset (14 watersheds)	68

LISTE DES ACRONYMES

AOGCM	Atmospheric-Ocean General Circulation Model
CCSM	Community Climate System Model
CRCM	Canadian Regional Climate Model
CGCM3	Canadian Global Climate Model version 3
CO ₂	Dioxyde de Carbone
CV	Coefficient de Variation / Coefficient of Variation
ECP2	Experimental Climate Prediction centre regional model 2
GCM	Global Climate Model
GEV	Generalized Extreme Value
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GLO	Generalized Logistic
GNO	Generalized Normal
GPA	Generalized Pareto
HadCM3	Hadley Centre Coupled Model, version 3
HRM3	Hadley Regional Model 3
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCG	Modèle de Circulation Générale
MM5I	MM5 – PSU/NCAR Mesoscale Model
MRC	Modèle Régional du Climat
NCEP	National Center for Environmental Prediction

NARCCAP	North American Regional Climate Change Assessment Program
NCAR	National Center for Atmospheric Research
PE3	Pearson Type 3
RFA	Regional Frequency Analysis
RCM	Regional Climate Model
RCM3	Regional Climate Model version 3
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
UQAM	Université du Québec à Montréal
WRFG	Weather Research & Forecasting model

LISTE DES SYMBOLES

H	Mesure d'homogénéité
Q	Quantile
Z	Z goodness-of-fit test statistic
T	Période de retour (années)
d	Durée précipitation (jours)

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif d'évaluer les changements appréhendés des précipitations extrêmes saisonnières d'une et plusieurs journées (1, 2, 3, 5, 7 et 10 jours) pour 21 bassins versants du nord-est canadien pour une période future (2041-2070) comparativement à une période de référence (1971-2000). Pour ce faire, un ensemble de multi-modèles régionaux du climat (MRC) provenant du North American Regional Climate Change Assessment Program est utilisé. Le projet comprend six MRC piloté par les ré-analyses II NCEP couvrant la période 1980-2004 et piloté par quatre modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) couvrant une période de référence (1971-2000) et future (2041-2070). L'analyse fréquentielle régionale est choisie comme méthode pour développer les niveaux de retour des précipitations extrêmes pour des périodes de retour de 10, 30 et 50 années.

L'étude comporte une évaluation de la performance des six différents MRC liée aux différences dans leurs composantes physiques et dynamiques ainsi qu'une évaluation de l'effet du choix des conditions aux frontières de type ré-analyses par rapport à de type MCGA. Les résultats suggèrent que les différences liées aux composantes internes des MRC sont plus importantes que celles liées au choix des conditions aux frontières. D'autre part, par l'utilisation d'un ensemble de multi-MRC et du coefficient de variation, une quantification des incertitudes liées à la structure interne du MRC et du choix MCGA comme pilote est possible. En général, les incertitudes liées à la structure interne des MRC sont plus importantes que celles liées au choix du MCGA pour les bassins versants et les variables de cette étude.

L'analyse des changements appréhendés dans les niveaux de retours des précipitations extrêmes suggère une augmentation pour la majorité des bassins et des combinaisons à l'étude (durée et période de retour). Les plus petites augmentations ainsi que les plus grandes incertitudes se retrouvent dans les bassins au sud-est du Québec. Au contraire, les plus grandes augmentations et les plus faibles incertitudes se retrouvent dans les bassins nordiques.

Une augmentation dans les niveaux de retour des précipitations extrêmes a des conséquences importantes sur la gestion et la conception des infrastructures existantes et futures, spécialement pour cette région du Canada où la production d'énergie hydro-électrique est omniprésente.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Les changements climatiques font maintenant consensus dans la communauté scientifiques. Conséquemment, des changements notables sont à prévoir dans l'atmosphère régissant notre climat. Une hausse des températures, prévue dans le quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC/IPCC) (Alley et al., 2007), affectera entre autres le cycle hydrologique. En effet, à des températures plus élevées, l'air peut contenir plus de vapeur d'eau et l'évaporation y est accrue, ayant pour conséquence une augmentation *de facto* des quantités de précipitations afin de rééquilibrer le cycle hydrologique. Plus spécifiquement, cela suggère donc une augmentation dans l'intensité, la fréquence et la durée des précipitations (Fowler et Hennessy, 1995). Des répercussions, surtout celles provenant des événements dits extrêmes, sont donc à prévoir sur de nombreux secteurs tant au niveau économique, social qu'environnemental. Des événements extrêmes peuvent survenir sous forme de sécheresses, de vagues de chaleur et de tempêtes de vent et de verglas, mais aussi sous forme de précipitations extrêmes.

Les changements dans les événements de précipitations extrêmes ont des conséquences beaucoup plus néfastes sur la société et l'environnement qu'un changement dans les précipitations moyennes. Ceci est lié à la capacité et prédisposition des installations et de l'environnement à s'adapter aux changements se produisant sur une plus longue période de temps. Au cours du XXI^{ème} siècle, de grands bouleversements sont donc à prévoir partout dans le monde. Il sera donc important pour les sociétés et gouvernements de développer de nouvelles infrastructures capables de s'adapter aux nouvelles réalités. Le printemps 2011 a été un bon exemple de l'incapacité des infrastructures à soutenir les véhémences du temps. Les inondations dans le sud du Québec, le Manitoba et le Mississippi, par exemple, ont créé de nombreux dégâts entraînant des coûts exorbitants à la société. Lors de la conception de

nouvelles infrastructures, de nouveaux lots d'habitation, barrages hydro-électrique et systèmes d'égouts, il sera important d'avoir une bonne vision de la climatologie actuelle et des années futures afin de minimiser le plus possible les conséquences des catastrophes naturelles (inondations, glissements de terrain, refoulement d'égouts, etc.). Au Québec, cette réalité est omniprésente du fait que l'hydro-électricité occupe une place substantielle (91%) de la production d'énergie totale de la province.

Le changement dans la réalité climatique actuelle survient en majeure partie à cause de l'activité anthropique croissante depuis le début du XX^{ème} siècle. L'effet de l'homme sur les changements climatiques prend effectivement de plus en plus d'importance. Avec les outils scientifiques s'améliorant sans cesse, il est maintenant possible de quantifier et de prévoir avec une certaine assurance la part du facteur humain dans les changements climatiques prévalant actuellement et dans le futur. Par exemple, l'année 2010 a établi un record en terme d'émission de CO₂ avec un total de 30,6 gigatonnes, une hausse de 5% par rapport au record de 2009 (Agence internationale de l'Énergie, 2011). Lors du sommet de Cancun en 2010, les pays participants ont convenu de ne pas dépasser le seuil de 32 gigatonnes d'émission en CO₂ afin de limiter la hausse prévue de la température moyenne planétaire à 2 degrés Celsius. Avec ce type de données, des scénarios climatiques sont produits par la communauté scientifique comme en 2007 par le GIEC. Entre autres, ceux-ci diffèrent les uns par rapport aux autres par la quantité de gaz à effet de serre qu'émettront les différentes nations du monde au courant du siècle prochain. Plusieurs facteurs entrent en jeu tels que l'accroissement de la population mondiale, le développement économique et les changements technologiques. Sommairement, plus la hausse de température prévue sera grande, plus les répercussions sur le cycle hydrologique seront importantes et, par le fait même, sur les précipitations extrêmes.

D'autre part, les effets sur les précipitations de ces changements de température se font surtout ressentir sur celles dites extrêmes plutôt que moyennes. En effet, dans le rapport du GIEC de 2007, l'augmentation des précipitations moyennes pour la période 2046-2065 et la période 2081-2100 par rapport à la période 1981-2000 se chiffre à 1,9% et à 3,4% respectivement, alors que l'augmentation des précipitations extrêmes est de 7,7% et 12,3%

pour les mêmes périodes respectives. Ces projections climatiques suivent le scénario A1B et sont confirmées par d'autres auteurs dont Emori et Brown en 2005. Conséquemment, une connaissance substantielle de l'évolution des précipitations extrêmes est essentielle afin de minimiser le plus possible les impacts négatifs de ces changements sur l'environnement et la population. Dans ce mémoire, l'étude des précipitations extrêmes est effectuée pour 21 bassins versants de la province du Québec en utilisant un ensemble de multi-modèles régionaux climatiques (MRC) provenant de NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program) (Mearns et al., 2009) pour une période de référence (1971-2000) et pour une période future (2041-2070).

Les simulations des différents MRC provenant du projet NARCCAP suivent le scénario A2 du GIEC 2007. Ce scénario se situe dans le haut de peloton des scénarios d'émissions du SRES (Special Report on Emissions Scenarios) publié par le GIEC avec un accroissement de la température prévue de 3,4 degrés Celsius (intervalle entre 2 et 5,4 degrés Celsius) entre les périodes 2090-2099 et 1980-1999. Celui-ci a été choisi du fait qu'il représente adéquatement la tendance actuelle d'émissions depuis le début de la décennie 1990 et qu'il est le plus utilisé par les autres modèles climatiques et études traitant des variations climatiques du futur. Au total, quatre grandes familles distinctes de scénarios (A1, A2, B1 et B2) ont été produites avec plusieurs sous-caractéristiques uniques à chacune d'entre-elles, ce qui a permis de développer un ensemble de 40 scénarios tous équiprobables. Le scénario A2 se distingue par un accroissement continu de la population et des émissions de CO₂ durant le XXI^{ème} siècle. En bref, ce scénario représente la réalité climatique qui prévaudra si aucun effort n'est fait pour différer de la tendance actuelle.

L'étude d'événements extrêmes se fait habituellement en calculant un niveau de retour $Q_{(d,T)}$ d'une durée (d) associé à une période de retour (T). La période de retour correspond à la probabilité inverse qu'un événement excède le niveau de retour associé à chacune des années. Par exemple, pour une période de retour de 20 ans, il y a 5 % (1/20) de chance qu'un événement d'une durée définie, par exemple 1 jour, dépasse le niveau de retour calculé à chacune des années. Pour calculer ces différentes valeurs, l'analyse fréquentielle constitue un bon moyen puisqu'elle jumèle fréquence et amplitude de la variable désirée.

L'analyse fréquentielle régionale (ARF) développée par Hosking et Wallis (1997) est une méthode très efficace pour calculer les extrêmes puisqu'elle convertit l'espace en temps. De fait, elle jumèle les données de plusieurs points d'observation/ de grille pour former un tout, un grand échantillon. Les points d'observation/de grille qui sont jumelés sont habituellement choisis du fait qu'ils présentent une similarité statistique selon la variable à l'étude. Pour une région donnée dite homogène, il est possible d'affirmer que les différents sites présents dans la région d'étude ont la même fréquence de distribution à un facteur scalaire au site près. La différence entre les moments de 2^{ème} ordre ou d'ordres supérieurs entre les différents sites doit être inférieure à la probabilité que le tout soit attribué au hasard. Des régions dites homogènes sont ainsi formées avec les différents sites. L'ARF a été utilisée dans de nombreuses études jusqu'à présent (Fowler et al., 2005; Mailhot et al., 2012 et Mladjic et al., 2011)

Pour ce projet, 21 bassins versants de la province du Québec sont à l'étude. Celles-ci, ayant été délimitées par Hydro-Québec/Ouranos, forment la plupart des principaux bassins versants du Québec au nord du fleuve Saint-Laurent et à l'ouest du Labrador. Chaque région, ayant chacun un exutoire commun et singulier, présente, théoriquement, des caractéristiques météorologiques similaires sur son domaine. Un test d'homogénéité tel que proposé par Hosking et Wallis (1997) est donc effectué pour chacune des régions afin de valider l'hypothèse d'uniformité et ainsi de pouvoir utiliser l'analyse fréquentielle régionale décrite précédemment. Pour ce faire, des données d'observation provenant des stations météorologiques d'Environnement Canada sont utilisées. Ces mesures prises aux différentes stations ont été ensuite interpolées sur une grille 10km par 10km par Krigeage avec correction du relief, ce procédé étant une méthode d'interpolation géostatistique. À cette résolution spatiale, l'estimation effectuée est optimale en fonction de la densité du réseau d'observation. Finalement, les points de grilles obtenus ont été moyennés et agrégés afin de coïncider avec le grillage utilisé par Hydro-Québec/Ouranos de 45km par 45km pour définir les masques des bassins versants. Cette grille couvre la grande majorité de l'Amérique du Nord et sera choisie comme grille de référence pour tous les MRC utilisés. Les données d'observation étant limitées ou inexistantes pour certains bassins nordiques, une partie des 21

bassins n'est peu ou pas couverte par ces observations rendant impossible une interpolation complète sur leur domaine. Ainsi, pour ces sept bassins n'étant pas couverts par les données d'observation, le test d'homogénéité sera effectué avec les simulations des différents MRC de cette étude pilotés par les ré-analyses provenant du National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

Les différents MRC provenant de NARCCAP ont tous un grillage différent les uns par rapport aux autres. Ils ont, en effet, la même résolution horizontale à 50km, mais avec des projections différentes. C'est pour cette raison que chacune des simulations sera interpolée sur la grille de référence décrite précédemment. D'autre part, le choix d'utiliser des modèles régionaux au lieu de modèles globaux est significatif et judicieux particulièrement dans le cas d'événements extrêmes. Effectivement, les précipitations extrêmes sont souvent localisées sur une superficie restreinte, celles-ci ne pourraient pas être conséquemment détectées à cause de la faible résolution des modèles climatiques globaux (MCG) (environ à 300km dans ce cas ci). Pour la période d'étude, mai à octobre, ceci est particulièrement vrai du fait que les précipitations estivales sont pour la plupart de type convectif et donc, de fine échelle. De plus, pour la plupart des bassins versants, une utilisation d'un grillage provenant d'un modèle global signifierait la présence d'un seul point de grille. Par le fait même, l'emploi de l'ARF deviendrait utopique. Ainsi, pour des études à petites échelles comme celle-ci, le modèle régional est le meilleur outil disponible. Ceux-ci sont par contre liés avec un domaine plus restreint que les MCG du fait qu'en ayant une haute résolution, il serait beaucoup trop long et onéreux de créer des simulations avec des MRC couvrant tout le globe avec l'équipement informatique disponible actuellement. Ceux-ci doivent donc être pilotés aux conditions frontières par des MCG ou par des ré-analyses (NCEP pour cette étude), rendant possible la création de diverses combinaisons et ainsi la comparaison de la sensibilité d'un MRC au choix des conditions aux frontières, c'est-à-dire un même MRC mais piloté par différents MCG ou ré-analyse. De même, le principe peut être utilisé en imposant le même pilote (MCG ou ré-analyse) à différents MRC.

Le fait d'utiliser un MRC amène toutefois plusieurs sources d'incertitudes auxquelles il est important de porter une attention particulière lors de l'analyse des résultats. Le

paramétrage et les processus utilisés dans le développement des MRC ainsi que leur domaine et résolution sont toutes des incertitudes liées à la structure même des MRC. D'un autre côté, comme mentionné précédemment, le choix et le type des conditions aux frontières sont d'autres importantes sources d'incertitudes liées à l'utilisation d'un MRC. Afin de pouvoir quantifier et évaluer ces incertitudes, l'utilisation d'un ensemble de multi-MRC, comme PRUDENCE (Christensen et al., 2007a) et ENSEMBLES (Christensen et al., 2009) pour l'Europe et NARCCAP pour l'Amérique du Nord, est préconisée. Dans ces projets, plusieurs MRC sont pilotés par deux différents types de conditions aux frontières, soit des données de ré-analyses soit des données provenant des MCG. De plus, différents scénarios climatiques et différentes versions de modèles sont utilisés. Il devient donc important d'utiliser un outil statistique permettant la comparaison de plusieurs types d'incertitudes. Pour ce faire, le coefficient de variation (CV) est tout désigné pour souscrire à ce type d'évaluation, celui-ci étant le rapport de l'écart-type sur la moyenne des différents niveaux de retours des simulations dans ce cas-ci. CV est en fait une mesure de la dispersion d'une série de données sans dimension. En d'autres mots, plus la valeur de CV se rapproche de 0, plus la confiance dans les résultats sera grande étant donné que la disparité entre les différentes simulations est petite et vice versa.

Les simulations pilotées par les MCG sont utilisées pour connaître les changements appréhendés de la variable à l'étude. De son côté, celles pilotées par NCEP sont utilisées pour estimer l'incertitude liée à l'application d'un forçage des conditions aux frontières et aux choix de celles-ci. Finalement, les données d'observation sont utilisées pour estimer la performance des différents MRC, tous étant pilotés par les mêmes conditions aux frontières (dans ce cas-ci NCEP). Cette dernière comparaison effectuée lors d'une période de référence (dans cette étude 1971-2000) permet ainsi d'estimer la confiance des résultats obtenus pour les simulations d'une période future (2041-2070). Cependant, l'estimation obtenue ne doit pas être prise comme étant la vérité absolue mais bien à titre indicatif du fait que la capacité d'un MRC à bien simuler une période de référence ne garantit pas nécessairement le même résultat pour une autre période d'étude.

L'utilisation de l'analyse fréquentielle comme méthode impose des hypothèses d'indépendance et de stationnarité. Dans cette étude, on admet l'hypothèse de stationnarité en supposant que le type de distribution des extrêmes de précipitation pour chacune des deux périodes d'analyse respectives (période de référence 1971-2000 et période future 2041-2070) soit la même. Cette hypothèse de stationnarité pour un échantillon de 30 années (une valeur par année pendant 30 ans) est acceptable en raison de la faible taille de l'échantillon. Diverses autres études acceptent l'hypothèse de stationnarité pour des échantillons de même taille (Fowler, 2007 et Mladjic, 2011). En ce qui concerne la dépendance inter-site dans les échantillons, l'utilisation d'intervalle de confiance pour les niveaux de retour calculés permet de s'assurer de l'indépendance des résultats. Ces intervalles de confiance sont calculés par la technique du vecteur *bootstrap* qui consiste à créer de nouveaux échantillons (1000 généralement) par tirage avec remise à partir de l'échantillon initial. La méthode du vecteur *bootstrap* assure à tous les bassins versants de cette étude d'avoir la même série aléatoire vectorielle pour les 1000 échantillons créés. En calculant l'écart-type (σ) de ces 1000 nouvelles valeurs obtenues grâce à cette méthode, il est possible de créer un intervalle de confiance symétrique autour du niveau de retour initialement calculé ($Q_{(d,T)}$) avec le degré de confiance souhaité, généralement 95%, à l'aide de la formule [$Q_{(d,T)} \pm 1,96 \times \sigma$] en supposant que l'échantillon suit la distribution d'une loi normale. Cette méthode permet en outre de s'assurer de l'indépendance des influences spatiales de premier ordre liée à l'étude des extrêmes.

Aucune étude n'a encore été faite sur la caractérisation des précipitations extrêmes dans un contexte de changement climatique au Québec particulièrement avec des régions définies à l'échelle des bassins versants. Cependant, Mladjic et al. (2011) ont effectué une caractérisation des précipitations extrêmes similaire à ce projet, mais en utilisant qu'un MRC et pour des régions d'études beaucoup plus grandes couvrant les différentes zones climatiques du Canada. Comme cette recherche ne contenait qu'un MRC, la quantification des incertitudes étaient plus limitée. D'autre part, Mailhot et al. (2012) ont effectué le même type de recherche sur les mêmes régions climatiques du Canada, mais en utilisant une partie de l'ensemble des simulations NARCCAP présentes dans cette recherche. Le projet NARCCAP n'étant toutefois pas encore complété, d'autres simulations se sont ajoutées entre

l'élaboration des deux études. En fait, sur un maximum de 12 simulations, huit d'entre-elles étaient disponibles au moment de l'écriture de ce mémoire. En général, les deux études suggèrent une augmentation appréciable des précipitations extrêmes.

En bref, dans cette étude, une analyse des changements dans l'amplitude des précipitations extrêmes saisonnières maximales de 1, 3 et 7 journées de mai à octobre pour 21 bassins versants de la province du Québec est effectuée pour une période de référence (1971-2000) et une période couvrant un climat future (2041-2070) avec un ensemble de multi-MRC. L'approche choisie est l'analyse fréquentielle régionale basée sur les L-moments. Les différents MRC provenant de NARCCAP utilisés dans cette étude sont le CRCM (OURANOS / UQAM), le ECP2 (UC San Diego / Scripps), le RCM3 (UC Santa Cruz / ITPC), le MM5I (Iowa State University / PNNL), le HRM3 (Hadley Centre) et le WRFG (Pacific Northwest National Lab / NCAR). Ceux-ci sont pilotés par différents MCG : le GFDL (NOAA), le CGCM3 (CCCMA), le HADCM3 (Hadley Centre) et le CCSM3 (NCAR) pour les projections du climat futur et par les ré-analyses NCEP pour la validation. Un total de 8 combinaisons provenant des MRC et MCG est utilisé pour les projections climatiques. Une comparaison est aussi effectuée avec des données d'observation recueillies à des stations météorologiques et interpolées à l'état de point de grille. Toutes les simulations et données d'observation sont interpolées pour qu'elles aient toutes le même grillage, la même résolution et projection, c'est-à-dire à la grille de référence à 45 KM de résolution vraie à 60 N.

Objectifs principaux de cette étude :

- 1) Effectuer l'analyse statistique de l'homogénéité des vingt-un bassins versants présents dans cette étude à l'aide des observations et des 6 simulations de validation (MRC piloté par NCEP).
- 2) Identifier la meilleure distribution régionale à 3 paramètres parmi 5 possibilités (GEV, GLO, GNO, PGA, PE3) afin de simuler les niveaux de retours des précipitations extrêmes.
- 3) Analyser la performance des MRC pilotés par NCEP en comparant leurs niveaux de retour avec celles provenant des données d'observation.

- 4) Analyser l'effet du choix du pilotage sur les niveaux de retour des précipitations extrêmes en comparant les simulations pilotées par les données de ré-analyse avec celles pilotées par des données de MCG et en évaluer l'incertitude à l'aide de l'outil statistique CV.
- 5) Estimer les changements appréhendés des niveaux de retour des précipitations extrêmes entre 2041-2070 (période future) et 1971-2000 (période de référence) en utilisant les simulations des MRC pilotées par les MCG.
- 6) Évaluer l'incertitude et la confiance dans les changements appréhendés à l'aide de la méthode du vecteur *bootstrap* et de l'outil statistique CV.
- 7) Analyser et discuter des conséquences assujetties aux résultats obtenus.

Organisation du mémoire :

À la suite de l'introduction présentée ci-haut, un article rédigé en anglais fera office de chapitre II pour ce mémoire et remplacera donc les chapitres II (méthodologie) et III (résultat) présents normalement dans un mémoire. Cet article comprends les sections suivantes : (1) l'introduction comprenant la revue littéraire et le contexte de l'étude, (2) la description des modèles et du domaine, (3) la méthodologie, (4) la présentation des résultats et (5) finalement une partie discussion et conclusion. Finalement, le chapitre III présentera les résultats de cette étude sous forme de discussion. Pour clore ce mémoire, des figures et tableaux supplémentaires n'ayant pas présentés dans l'article sont fournis dans les annexes A et B, portant entre autres sur les résultats obtenus pour les précipitations extrêmes d'une durée de 2, 5 et 10 journées.

CHAPITRE II

PROJECTED CHANGES TO PRECIPITATION EXTREMES FOR NORTHEAST CANADIAN WATERSHEDS USING A MULTI-RCM ENSEMBLE

A. Monette¹, L. Sushama¹, M.N. Khaliq^{1,2}, R. Laprise¹ and R. Roy^{1,3,4}

¹Centre ESCER (Étude et Simulation du Climat à l'Échelle Régionale), University of Quebec
at Montreal, 201-President-Kennedy, Montreal, Quebec, Canada H3C 3P8

²Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, 11 Innovation Boulevard,
Saskatoon, Saskatchewan S7N 3H5, Canada

³Ouranos, 550 Sherbrooke Street West, 19th Floor, West Tower, Montreal, Quebec H3A 1B9,
Canada

⁴Hydro-Quebec, 1800 Lionel-Boulet Boulevard, Varennes, Quebec J3X 1S1, Canada

(Published in Journal of Geophysical Research-Atmosphere)

Abstract

This study focuses on projected changes to seasonal (May-October) single- and multi-day (i.e. 1-, 2-, 3-, 5-, 7-, and 10-day) precipitation extremes for 21 Northeast Canadian watersheds for the 2041–70 future period with respect to the 1971–2000 current period using a multi-Regional Climate Model (RCM) ensemble available through the North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP). The set of simulations considered in this study includes simulations performed by the six NARCCAP RCMs for the 1980–2004 period driven by NCEP reanalysis II and those driven by four Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) for the current 1971–2000 and future 2041–2070 periods. Regional frequency analysis approach is used to develop projected changes to selected return levels of precipitation extremes, i.e. 10-, 30- and 50-yr return levels of single- and multi-day precipitation extremes. The performance errors due to internal dynamics and physics of each of the six participating RCMs and the lateral boundary forcing errors due to the errors in the lateral boundary forcing data are studied. Results in general suggest that the performance errors are larger than the lateral boundary forcing errors for the majority of the precipitation characteristics and watersheds considered. The use of a multi-RCM ensemble enabled simple quantification of RCMs' structural and AOGCM related uncertainties in terms of the coefficient of variation. In general, the structural uncertainty appears to be larger than that associated with the choice of the driving AOGCM based on the set of simulations analysed in this study. Analyses of ensemble-averaged projected changes to various return levels show an increase for majority of the watersheds, with south-easternmost watersheds associated with smaller changes and higher uncertainties compared to rest of the watersheds. It is expected that increases in return levels of short and longer duration precipitation extremes will have important implications for various water resources related development and management activities such as hydropower generation in this region of Canada.

Keywords: Climate change; Extreme precipitation; Regional Climate Models; Regional Frequency Analysis

2.1. Introduction

In a warmer projected climate, the water-holding capacity of the atmosphere, and hence the evapotranspiration and the precipitation potential, is expected to increase and this favors increased climate variability, with more intense precipitation (Trenberth et al., 2003). Such changes to the intensity and frequency of precipitation extremes can in turn lead to enormous environmental, social and political repercussions (Emori and Brown, 2005; Tebaldi et al., 2006). It, therefore, becomes necessary to assess changes to extremes and associated uncertainties in the context of a changing climate, to support proper management and adaptation strategies.

The primary tools to study anticipated climate changes are the coupled global and regional nested models and the transient climate-change projections obtained when those models are run with projected anthropogenic forcing (Alley et al., 2007). Global Climate Models (GCMs), because of their still relatively coarse resolution, have difficulties in simulating extreme weather events with the intensity and frequency comparable to what is observed, particularly precipitation extremes. Regional Climate Models (RCMs), with their higher spatial resolution, compared to that of the GCMs, allow for greater topographic realism and finer-scale atmospheric dynamics to be simulated and thereby better represent precipitation extremes as demonstrated in a number of recent studies (Feser, 2006; Seth et al., 2007; Prommel et al., 2010; De sales and Xue, 2010; Di Luca et al., 2011). This improved representation of severe weather phenomena in RCMs has motivated various studies on projected changes to heavy precipitation on the basis of RCM simulations for different parts of the world (Christensen and Christensen, 2003; Fowler et al., 2005; Beniston et al., 2007; May, 2008; Nikulin et al., 2011; Mladjic et al., 2011). While some of these studies used a single RCM in their analysis, the use of multi-RCM ensembles is highly recommended. RCMs are associated with various sources of uncertainties (de Elia et al., 2008), which include (a) structural uncertainty associated with model formulation (e.g., domain size and location, relaxation technique, nesting configuration, driving imperfections, processes and parameterization), (b) internal variability (triggered by differences in the initial conditions),

and (c) dependence on boundary forcing (i.e. type of Atmosphere Ocean General Circulation Model (AOGCM)). Multi-RCM ensemble as in PRUDENCE (Christensen et al., 1997) and ENSEMBLES (Christensen et al., 2009) projects over Europe is essential to better quantify various uncertainties. The North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP; Mearns et al., 2009) is such a multi-RCM ensemble project over North America.

This study focuses on the evaluation and assessment of future changes to selected return levels of seasonal single- and multi-day (i.e. 1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day) precipitation extremes over 21 selected north-east Canadian watersheds spread mainly across the province of Quebec and extending through some parts of Ontario and Newfoundland and Labrador provinces, using the above mentioned NARCCAP multi-RCM ensemble and Regional Frequency Analysis (RFA) approach (Hosking and Wallis, 1997). These watersheds are very important to hydroelectric power generation and therefore information on projected changes to extreme precipitation is important for better management and adaptation of reservoirs in the region. In fact, 96% of total energy produced in the province of Quebec is hydro-based and is thus very important to the economy of the province (Ministère de Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2009; <https://www.mrn.gouv.qc.ca>). In addition, 'Plan Nord' (<http://plannord.gouv.qc.ca>) launched recently by the province, is planning to generate additional hydroelectricity from the same region in the coming years. No similar comprehensive study of extreme precipitation characteristics has been undertaken so far for the region, particularly at the watershed scale. A recent study by Mladjic et al. (2011) looked at projected changes to single- and multi-day precipitation extremes, but for various climatic zones in Canada, using the RFA approach and an ensemble of Canadian RCM (CRCM) simulations. Their results suggest significant increases in regional return levels for both single- and multi-day precipitation extremes, for the climatic regions considered in their study. Since the study was based on a single-model ensemble, it was possible only to address uncertainty associated with the internal variability of the RCM and natural variability of the driving AOGCM. Following this, Maillhot et al. (2012) analyzed precipitation extremes for the same climatic regions over Canada considered in Mladjic et al. (2011), but using NARCCAP simulations. Their findings agree in general to those of Mladjic et al. (2011) presented earlier.

The paper is organized as follows. A brief description of the NARCCAP simulations and the observed data used in this study are given in section 2. The methodology used is described in section 3. Section 4 presents results related to the assessment of various errors and uncertainties in the precipitation characteristics considered based on NARCCAP simulations followed by projected changes to these characteristics. Discussion and main conclusions of the study are provided in section 5.

2.2. Simulations and observations

2.2.1. NARCCAP simulations

The precipitation extremes analysed in this study are derived from the multi-RCM ensemble available from NARCCAP (www.narccap.ucar.edu). The six RCMs participating in the NARCCAP program are run over similar North American domains covering Canada, USA and most of Mexico; the acronyms and full names of the participating RCMs are given in Table 1. Further details of individual models are available from NARCCAP (www.narccap.ucar.edu/data/rcm-characteristics.html) and Mearns et al. (2009). It should be noted that all RCMs use same horizontal resolution of 50 km, but different projections.

The protocol of NARCCAP demands that each participating RCM will be driven by the National Center for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis and by two distinct AOGCMs for the SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A2 scenario (Mearns et al., 2009). At the time of this study, all six RCMs (CRCM, RCM3, MM5I, ECP2, WRFG and HRM3) have had performed simulations driven by both NCEP and at least one AOGCM. The four AOGCMs used to drive the RCMs are CGCM3, CCSM3, HadCM3 and GFDL (see Table 1). Eight RCM-AOGCM pairs were available at the time of the study: two RCMs (CRCM and RCM3) had been driven by two AOGCMs each and the other four RCMs (WRFG, ECP2, MM5I and HRM3) had been driven by one AOGCM.

The NCEP-driven simulations are available for the 1980–2004 period, while the AOGCM-driven simulations are available for the current 1971–2000 and future 2041–70 periods. The NCEP-driven simulations are used to verify simulated precipitation characteristics of individual NARCCAP RCMs, while the AOGCM-driven current and future simulations are used in the assessment of projected changes to studied precipitation characteristics. This is discussed in detail in the section on methodology. Throughout this article, the different NARCCAP RCM simulations will be referred to as ‘RCM_LBC’, where RCM stands for the acronym of the respective RCM and LBC for the lateral boundary condition, i.e. NCEP or the AOGCM driving the regional model at its boundaries. For example, CRCM simulation driven by CGCM3 will be referred to as CRCM_CGCM3.

Though the simulation domains of the RCMs cover most of North America, this study focuses on the north-east part of the domain, which consists of 21 watersheds located mainly in the Quebec province of Canada. The watersheds are shown in Fig. 1 and further details are given in Table 2.

2.2.2 Observed data

The observed precipitation extremes used in this study are derived from a gridded daily precipitation dataset at 10 km resolution developed by Hydro-Quebec (Tapsoba, 2010), for the province of Quebec and parts of the adjoining provinces, using meteorological station dataset from Environment Canada, Quebec provincial government and private agencies; it must be noted that the station density underlying this gridded dataset decreases from south to north. This gridded dataset, developed using kriging with an external drift approach (Tapsoba et al., 2005; Haberlandt, 2007), spans the 1971–2000 period and covers part of the study area (see Fig. 1), i.e. 14 central and southern watersheds out of the total 21, and has been used in a number of recent studies (e.g. Brown, 2010). The precipitation extremes derived from this dataset are used for verifying statistical homogeneity of watersheds for the current climate time window and for selecting the most appropriate regional distribution for modelling precipitation extremes (discussed in detail in the methodology section), and in the assessment of performance errors associated with the individual NARCCAP-RCMs.

2.3. Methodology

2.3.1. Reference grid

Due to the different grid projections of different RCMs, a reference grid with a horizontal resolution of 45km and polar-stereographic projection is used; this grid was selected since all watershed masks were already defined for this grid and it has been used in a number of previous studies. All model simulated data were interpolated to this reference grid using the inverse distance squared method (<http://www.ncl.ucar.edu/>) before performing any analysis, while the observed data were aggregated to the reference grid.

2.3.2. Precipitation characteristics and their estimation

The precipitation characteristics considered in this study are 10-, 30- and 50-yr return levels of seasonal (May–October) single- and multi-day (1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day) maximum precipitation amounts; for the multi-day cases, running window approach was used. May–October period is selected to avoid mixing of snow and rainfall related extremes.

As mentioned earlier, RFA framework based on L-moments (Hosking and Wallis, 1997) is used in the study of precipitation characteristics. In general, there are two main steps involved in the RFA approach: (1) identification of statistical homogeneous regions and (2) selection of an appropriate regional distribution to generate regional growth curves, where a regional growth curve represents a dimensionless relationship between frequency and magnitude of extreme values. In implementing these two steps, each watershed is considered a region and precipitation extremes derived from observed dataset and NCEP-driven simulations are used.

The statistical homogeneity of all watersheds is verified using regional homogeneity tests based on L-moment ratios, as devised by Hosking and Wallis (1997). Accordingly heterogeneity measures for a region are based on values of H1, H2 and H3 – the weighted

standard deviation of (i) L-coefficient of variation, (ii) L-skewness and (iii) L-kurtosis, respectively. These measures are derived using Monte Carlo simulations. A region may be regarded as “acceptably” homogenous for H values below 1, “possibly” heterogeneous for H values between 1 and 2, and “definitely” heterogeneous for H values equal and above 2. Precipitation extremes derived from both observed datasets and NCEP-driven simulations are used to evaluate homogeneity measures for 14 of the 21 watersheds, while for the remaining seven watersheds with no observational data, the homogeneity tests are based only on NCEP-driven simulations.

After verifying statistical homogeneity of watersheds, the next step is the selection of an appropriate regional distribution for each watershed from amongst some candidate distributions for developing regional growth curves, where a regional growth curve represents a dimensionless relationship between frequency and magnitude of extreme values. The five candidate distributions considered in this study include Generalized Extreme Value (GEV), Generalized Pareto (GPA), Generalized Logistic (GLO), Pearson Type-3 (PE3) and Generalized Normal (GNO). These distributions are commonly used for frequency analysis of hydrometeorological extremes. The cumulative distribution functions and L-moment relationships for these distributions can be found in Hosking and Wallis (1997).

The Z test developed by Hosking and Wallis (1997) is used to pick the most appropriate regional distribution from among the five candidate distributions GEV, GPA, GLO, PE3 and GNO. The distribution with the smallest value of the Z test-statistic is chosen as the potential best candidate distribution for each statistical homogeneous region and duration (i.e., 1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day) of maximum observed precipitation. The overall best fitting distribution is then identified and adopted for all homogeneous regions.

The simulated regional return levels of single- and multi-day precipitation extremes for each homogeneous region are computed by multiplying regional growth factors, derived from respective regional growth curve, with the regionally averaged grid-cell mean values of precipitation extremes. The same procedure is used for deriving observed return levels but by employing the above mentioned statistics from the observed dataset. Ensemble averaged

regional return levels of single- and multi-day precipitation extremes are computed through simple averaging, i.e. by assigning equal weight to regional return levels of each individual simulation. Return levels associated with various combinations of return periods (10-, 30- and 50-yr) and precipitation durations (1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day) will be referred to as $Q_{(d,T)}$ in this article, where d refers to the duration and T the return period.

2.3.3. Performance and lateral boundary forcing errors

The characteristics of single- and multi-day precipitation extremes from the six NCEP-driven RCM simulations are compared to those observed for the 14 southern watersheds, to assess the performance error, i.e. errors due to the internal dynamics and physics of the model, of each RCM. The lateral boundary forcing errors are assessed by comparing precipitation characteristics derived from AOGCM-driven RCM simulations for the current 1980–2000 period to those derived from NCEP-driven RCM simulations for the same time period for all 21 watersheds.

2.3.4. Structural and AOGCM related uncertainties

As discussed earlier, the structural uncertainty is associated with model formulation including choice of the domain size and configuration, process representation and parameterization among others. Though difficult to assess each of these uncertainties separately based on the simulations available, an attempt is made to quantify the combined structural uncertainty. The spread among the various NCEP-driven RCM simulations, expressed in terms of the coefficient of variation (CV) – defined as the ratio of the standard deviation to mean value of return levels – is used to quantify the structural uncertainty. This measure has recently been used by Poitras et al. (2011), Henrich and Gobiet (2011), Mailhot et al. (2012) and Crétat and Pohl (2011) to study uncertainty in various contexts.

Similar to the structural uncertainty, RCM uncertainty associated with the choice of the AOGCM is measured using CV, defined here as the spread between simulations of the

same RCM driven by different AOGCMs. In the ensemble considered in this study, as already discussed, two RCMs (CRCM and RCM3) have been driven with two AOGCMs each; thus, the spread in terms of CV is computed for the two models separately.

The RCM uncertainty associated with the choice of the AOGCM is compared with the structural uncertainty for the various precipitation characteristics considered in this study. The use of CV makes this comparison possible.

2.3.5. Projected changes

Projected changes to return levels of single- and multi-day precipitation extremes are assessed by comparing current and future period integrations of 8 RCM_AOGCM pairs. The level of confidence in projected changes to return levels for various watersheds is evaluated using CV, defined as the ratio of the standard deviation to the ensemble-mean projected change based on the eight pairs of RCM_AOGCM current and future simulations. Small (large) values of CV are suggestive of high (low) level of confidence associated with the projections.

Significance of projected changes to return levels of single- and multi-day precipitation extremes for each of the RCM_AOGCM pairs are also assessed as discussed below. Confidence intervals are developed for both current and future return levels for all RCM_AOGCM pairs using the nonparametric vector bootstrap resampling method (Efron and Tibshirani, 1993; GREHYS, 1996; Davison and Hinkley, 1997; Khaliq et al., 2009; Mladjic et al., 2011). Though the nonparametric bootstrap method provides narrow confidence intervals compared to the parametric bootstrap, the advantage of the former method is that it takes care of the influence of first-order spatial correlations on estimates of confidence intervals. For each RCM_AOGCM pair and homogeneous region, one thousand resamples are used to develop confidence intervals assuming 5% significance level and normality of growth factors corresponding to selected return periods. By multiplying upper and lower limits of the above confidence intervals with the original regional mean value of extremes provide the required intervals for $Q_{(d,T)}$ values. It should be noted that this method

results in symmetric intervals. If for a given AOGCM-driven RCM current and future simulation pair such confidence intervals for a specific $Q_{(d,T)}$ value do not overlap, the projected change between future and reference simulations is considered statistically significant.

2.4. Results

Since statistical homogeneity is a pre-requisite for the RFA approach, results from this analysis are presented first, followed by evaluation of RCM simulated precipitation characteristics and their projected changes. Though complete analyses are performed for 1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day precipitation extremes, detailed results are presented only for 1-, 3- and 7-day extremes. Where appropriate, results for the remaining (i.e. 2-, 5- and 10-day) extremes are also discussed.

2.4.1. Statistical homogeneity analysis

Statistical homogeneity of all 21 watersheds is examined using May–October single- and multi-day precipitation extremes. For watersheds with no observational data (ARN, BAL, FEU, GEO, MEL, NAT and PYR), extremes derived from NCEP-driven RCM simulations are used for this analysis. A watershed is classified as homogeneous if the homogeneity criterion, described earlier in the methodology section, is satisfied. Out of the 14 watersheds, for which observational records are available, 11 watersheds (BEL, BOM, CAN, GRB, MAN, MOI, RDO, ROM, RUP, SAG and WAS) satisfy homogeneity criteria with H values smaller than 1 for precipitation extremes of all durations; two other watersheds (CHU and LGR) satisfy the homogeneity criteria for majority of the cases (i.e. durations of precipitation extremes) considered, while the STM watershed marginally satisfy homogeneity requirements. In general, the results of homogeneity analysis based on extremes derived from NCEP-driven RCM simulations agree with those based on observed data for these southern watersheds.

The remaining seven watersheds (ARN, BAL, FEU, GEO, MEL, NAT and PYR), for which no observational records were available and extremes from NCEP-driven RCM simulations were employed, also satisfy the homogeneity criteria. Thus, all 21 watersheds are assumed homogeneous for RFA of single- and multi-day seasonal precipitation extremes. After performing tests of homogeneity, the best fitting distributions from among the GEV, GLO, GNO, GPA and PE3 candidate distributions were identified for each of the homogeneous regions (i.e. watersheds). A systematic analysis using the Z goodness-of-fit test suggests that the GEV distribution is the overall best-fit distribution followed by GNO, GLO, PE3 and GPA. Therefore, the GEV distribution is used for further analysis in this study for all 21 watersheds.

2.4.2. Performance and boundary forcing errors

The spatial distribution of observed regional return levels associated with 10-, 30- and 50-yr return period for 1-, 3- and 7-day precipitation durations for 14 watersheds are presented in Fig. 2. In general, the return levels decrease from south to north for all combinations of precipitation durations and return periods presented in the figure. It should be noted that observed 10-yr return levels of seasonal 1-day maximum precipitation ($Q_{(1,10)}$) vary from 35 mm for CAN to 50 mm for STM while the 50-yr return levels of 7-day seasonal maximum precipitation ($Q_{(7,50)}$) range from 88 mm for GRB to 125 mm for WAS.

The performance errors are assessed by comparing simulated return levels derived from NCEP-driven RCM simulations to those observed. Figs. 3 and 4 show results for $Q_{(1,10)}$ and $Q_{(7,50)}$, respectively. Observations being available only for 14 out of 21 watersheds, assessment of performance errors are limited to these 14 watersheds. Large variation can be noticed among NARCCAP RCMs, with CRCM underestimating $Q_{(1,10)}$ while HRM3 and ECP2 overestimate. The other three models, MM5I, RCM3 and WRFG overestimate over the northern watersheds while both under- and over-estimation can be noticed for the southern watersheds; the magnitude of under/overestimation is generally smaller than that for CRCM,

HRM3 and ECP2. For return levels associated with higher return period and longer duration of precipitation extremes (e.g. $Q_{(7,50)}$), the results are similar to that of $Q_{(1,10)}$ except that there are more watersheds where the values are underestimated. The physical reasoning behind the under/overestimation by individual RCMs require more in-depth analysis and understanding of model formulations in detail, and is therefore not explored in this article. One should also be aware of the influence of sparseness of station density underlying the observed gridded dataset on observed precipitation extremes, particularly for the northern basins covered by the dataset, and therefore on the quantification of performance errors of RCMs as pointed out by Hofstra et al. (2010).

Using a multi-RCM ensemble gives the possibility of averaging results of different models, thereby reducing the uncertainty associated with a single model. In this study, ensemble average is calculated with equal weights for each member of the ensemble. The difference between the ensemble average of return levels for the NCEP-driven RCM simulations and those observed are also shown in Figs. 3 and 4 for $Q_{(1,10)}$ and $Q_{(7,50)}$, respectively. In general the differences are smaller than those obtained for most of the individual models.

The lateral boundary forcing errors are assessed by comparing NCEP-driven vs. AOGCM-driven simulations for the 1980–2000 period and are illustrated in Fig. 5 for 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for all studied watersheds. As discussed earlier, four of the six RCMs have been driven by one AOGCM, while the other two RCMs have been driven by two distinct AOGCMs, leading to the eight sets of scatter plots shown in Fig. 5. Overall, results suggest that for the majority of the cases (57% of the total cases presented in Fig. 5), the difference between AOGCM- and NCEP-driven RCM simulated return levels is smaller than 10%. Larger differences are associated with longer return periods in general.

It should be noted that for ECP2, return values for AOGCM-driven simulations are smaller than those for NCEP-driven simulations for all watershed (except ROM) and for most of the return period and precipitation duration combinations. On the contrary, for HRM3, return values for AOGCM-driven simulation are larger for at least 17 out of 21 watersheds

than those of NCEP-driven simulation for all precipitation duration and return period combinations. Large differences are associated with northern watersheds, especially for longer duration (7-day) cases. The lateral boundary forcing errors are relatively larger for HRM3 and ECP2 compared to other models.

Comparison of performance errors and lateral boundary forcing errors suggest that performance errors, in general, are larger than the boundary forcing errors for most of the cases (i.e. return period – precipitation duration combinations) analysed, including those corresponding to 2-, 5- and 10-day precipitation durations.

2.4.3. RCMs structural and AOGCM related uncertainties

Figure 6 shows the spread, in terms of CV, among the NCEP-driven RCM simulations, which is a simple quantification of structural uncertainty. Though the CV values are small for majority of the watersheds, they generally increase with return period. For all precipitation duration-return period combinations considered, the southernmost and easternmost watersheds are associated with relatively larger values of CV suggesting larger structural uncertainty for these watersheds compared to northern ones.

To assess the uncertainty associated with the driving AOGCM, we now turn to the two RCMs that have been driven by two distinct AOGCMs. It is difficult to adequately quantify the uncertainty associated with the driving AOGCM since only two AOGCMs are used to drive the same RCM. Nevertheless, CV for both RCM3 and CRCM (figure not shown) provides a rough estimate of this uncertainty. The results suggest that compared to structural uncertainty, the uncertainty associated with the driving AOGCM is relatively small. A better quantification of this uncertainty can only be achieved when more AOGCMs are used to drive the same RCM. In some similar studies conducted within the ENSEMBLES project (Christensen et al., 2009) over Europe, it was found that the uncertainty associated with the AOGCMs is larger than the structural uncertainty for some variables and seasons.

2.4.4. Projected changes

In the present article, projected changes to precipitation extremes are studied at the watershed/regional scale by comparing the selected return levels derived from AOGCM-driven simulations for future 2041–70 period with those for the current 1971–2000 period, for the eight AOGCM/RCM pairs. It is assumed here that the frequency distribution remains stationary for the current and future periods. The spatial patterns of current-period AOGCM-driven RCM simulated return levels (figure not shown) is very similar to that of NCEP-driven RCM simulations and observations, with return levels decrease from south to north. Figure 7 shows ensemble-averaged projected changes to 10-, 30- and 50-yr return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for the future 2041–70 period with respect to the current 1971–2000 period. An increase in return levels in future climate is projected for nearly all watersheds, with relatively smaller (positive/negative) changes for some of the south-easternmost watersheds. One- and 3-day return levels are associated with larger increases compared to 7-day cases. Average change for all watersheds, return periods and precipitation durations is of the order of 13%, with minimum changes in the 5 to 9% range for the south-eastern watersheds ROM, NAT, CHU and MOI, while maximum changes of the order of 16 to 18% is noted for the northern watersheds (ARN, BAL, FEU, PYR and MEL).

Figures 8 and 9 show CRCM projected changes, when driven by CCSM and CGCM3, respectively. While the mean changes for all watersheds lie in the 7% range for CRCM_CCSM, it is around 18% for CRCM_CGCM3. Nevertheless, for both, highest increases in return values are found for short-duration precipitation extremes compared to longer duration extremes. While CRCM_CCSM suggests decreases in return values for the south-eastern watersheds, it is not as widespread for CRCM_CGCM3. The largest increases are found for the three northernmost watersheds, ARN, FEU and MEL with CRCM_CGCM3 for most of the return levels presented in Fig. 9, while it varies with the duration of precipitation for CRCM_CCSM. Thus, though the climate change signal appears to be consistent for most of the watersheds (with the exception of some eastern and south-western watersheds), important differences in magnitude can be noted between CRCM_CGCM3 and CRCM_CCSM projections. Similar to the case of CRCM, noticeable difference is found in

the magnitude of projections for the two RCM3 simulations with average projected increase of 9% for RCM3_CGCM3 and 16% for RCM3_GFDL. The above comparison highlights the need to use several AOGCMs at the boundaries to assess the uncertainty associated with the driving AOGCM.

Figure 10 shows the CV (defined in the methodology section) associated with projected changes to regional return levels for the multi-RCM ensemble. Coefficient of variation is a useful measure in associating a level of confidence with projected changes for the studied watersheds. The value of CV for projected changes to $Q_{(1,10)}$ is less than 1.0 for all watersheds, suggesting relatively high confidence in the projections for this return level for all watersheds. In all cases, larger CVs are noted for eastern watersheds (CHU, GEO, MOI, NAT and ROM), particularly for higher return periods and precipitation durations, suggesting low level of confidence in the projections for these watersheds.

The statistical significance of projected changes to single- and multi-day precipitation extremes from current to future climate is assessed at 5 and 10% significance levels (see Figs. 11 and 12, respectively) using the nonparametric vector bootstrap approach described in the methodology section. These figures show the number of RCM_AOGCM pairs that suggest statistically significant changes. These results are also summarized in Table 3 for each return period and precipitation duration combination. Majority of the 8 RCM_AOGCM pairs suggest significant increases in 10-yr return levels of single- and multi-day extremes. The number of RCM_AOGCM pairs that suggest significant changes is generally limited to 3–5 range for the south-eastern watersheds. With increasing return period, a drop in the number of pairs that suggest significant changes is obvious in Figs. 11 and 12. Clearly, more number of RCM_AOGCM pairs suggests significant changes at 10% significance level for all cases shown in these figures. It should be noted that negative changes to selected return levels are not found statistically significant for any of the watershed.

Finally, it is important to mention that projected changes to precipitation extremes were studied earlier by Mladjic et al. (2011) and Mailhot et al. (2012) for large Canadian climatic regions. Though the results of the present study agree in general with those of the

above two studies, important spatial patterns of projected change emerged by performing watershed level analyses.

2.5. Summary and conclusions

An evaluation of single- and multi-day (i.e. 1-, 2-, 3-, 5-, 7-, and 10-day) precipitation characteristics, and their projected changes are assessed using a multi-RCM ensemble for 21 north-east Canadian watersheds covering mainly the Quebec province of Canada. The precipitation characteristics considered are 10-, 30- and 50-yr return levels of single- and multi-day precipitation extremes, which are modelled for the selected watersheds using the RFA approach (Hosking and Wallis, 1997). The multi-RCM ensemble is provided by NARCCAP and we consider six different RCMs and their simulations. The simulations considered in this study include six NCEP-driven RCM simulations for the 1980–2000 period and eight pairs of AOGCM-driven RCM simulations for current (1971–2000) and future (2041–70) periods following the SRES A2 scenario. A gridded dataset of daily precipitation available at 10 km resolution from Hydro-Quebec is used for evaluation purposes.

Statistical homogeneity of the 21 watersheds used in the study is verified following regional homogeneity tests devised by Hosking and Wallis (1997). This is followed by the selection of a best fitting distribution for each of the watersheds as well as an overall best-fitting distribution for the entire study area. The GEV distribution is picked as the overall best fitting distribution, from among the five candidate distributions (GNO, GEV, GLO, PE3 and GPA). Performance errors associated with various RCMs and simple quantification of RCM structural uncertainty, followed by the effect of boundary conditions and projected changes to 10-, 30- and 50-yr return levels of 1-, 2-, 3-, 5-, 7- and 10-day precipitation extremes are analysed. An attempt is made to associate some level of confidence with projected changes to return levels for various watersheds followed by an assessment of statistical significance of projected changes.

From the analyses presented in this paper, the following main conclusions can be drawn:

(1) Comparison of 10-, 30- and 50-yr return levels, derived from NCEP-driven RCM simulations, against those derived from observed dataset suggests positive performance errors for most of the RCMs (except for CRCM) for low return period and short duration extremes. The CRCM generally underestimates observed return values. Nevertheless, for higher return period and longer duration cases, the tendency is less obvious as nearly half of the RCMs underestimate the return values. Based on the average absolute differences between observed and RCM simulated return levels, WRFG performs better compared to other RCMs for the precipitation characteristics considered in this study, followed closely by RCM3 and MM5I. Ensemble averaged return values, in general, are found to be close to those obtained with RCM3, WRFG and MM5I, for most of the watersheds.

(2) In a similar manner, lateral boundary forcing errors, obtained by comparing return levels derived from NCEP-driven and AOGCM-driven simulations suggests smaller difference compared to performance errors. In general, the lateral boundary forces errors are less than 10% between the two simulations (AOGCM vs. NCEP driven).

(3) Structural uncertainty, represented by the spread of the NCEP-driven RCM simulations, i.e. CV, is in general less than 0.2 for all watersheds, for all precipitation duration-return period combinations considered. Concerning RCM uncertainty associated with the driving AOGCM, results based on CRCM simulations driven by two different AOGCMs and RCM3 (also driven by two AOGCMs), suggest smaller uncertainties compared to the structural uncertainty.

(4) In general, all models suggest an increase in return levels with important differences between each model. Overall, larger projected changes are found for northern watersheds, while the smallest projected changes are found for south-eastern watersheds. Even though negative changes of larger percentage are noted for individual models, the majority of these changes are within the 0–5% range. The largest increase (19%) is associated with HRM3_HADCM3, which is also associated with largest differences for performance errors and choice of boundary conditions. A similar observation is noted for ECP2_GFDL case that is associated with the smallest change (6%).

(5) The CV, used to assess confidence in projected changes, suggests low-confidence for south-eastern watersheds (especially CHU, MOI, NAT, and ROM). This is particularly true for higher return periods of longer duration precipitation extremes.

Consequently, the number of RCM/AOGCM pairs suggesting significant changes for these watersheds are generally limited to one or two.

In regions with significant changes in precipitation extremes, environment and society would be impacted, e.g. combined sewer systems and management of flood control structures in fast responding areas and water storage systems. The results of the present study would be useful for designing future hydroelectric facilities in Quebec province of Canada.

When the entire NARCCAP project will be completed, we suggest investigation of a larger and complete multi-RCM ensemble: 12 (instead of eight) reference and future period simulations will in fact be available. Future improvements of model parameterization and changes in scenario development may produce different, perhaps better, estimates than the ones presented in this study. It will also be interesting to explore the physical mechanisms responsible for the changes in precipitation extremes similar to for example Jaeger and Seneriatne (2011).

Acknowledgements

This research was undertaken as part of a Collaborative Research and Development (CRD) project funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada, Hydro-Quebec and Ouranos Consortium. The authors would like to thank Dominique Tapsoba, from Hydro-Quebec, for providing gridded observed precipitation dataset and to NARCCAP project team for the RCM simulated precipitation data used in this study and three anonymous referees for their helpful comments. The first author would like to thank Debasish PaiMazumder and Bratislav Mladjic for technical assistance.

FIGURES

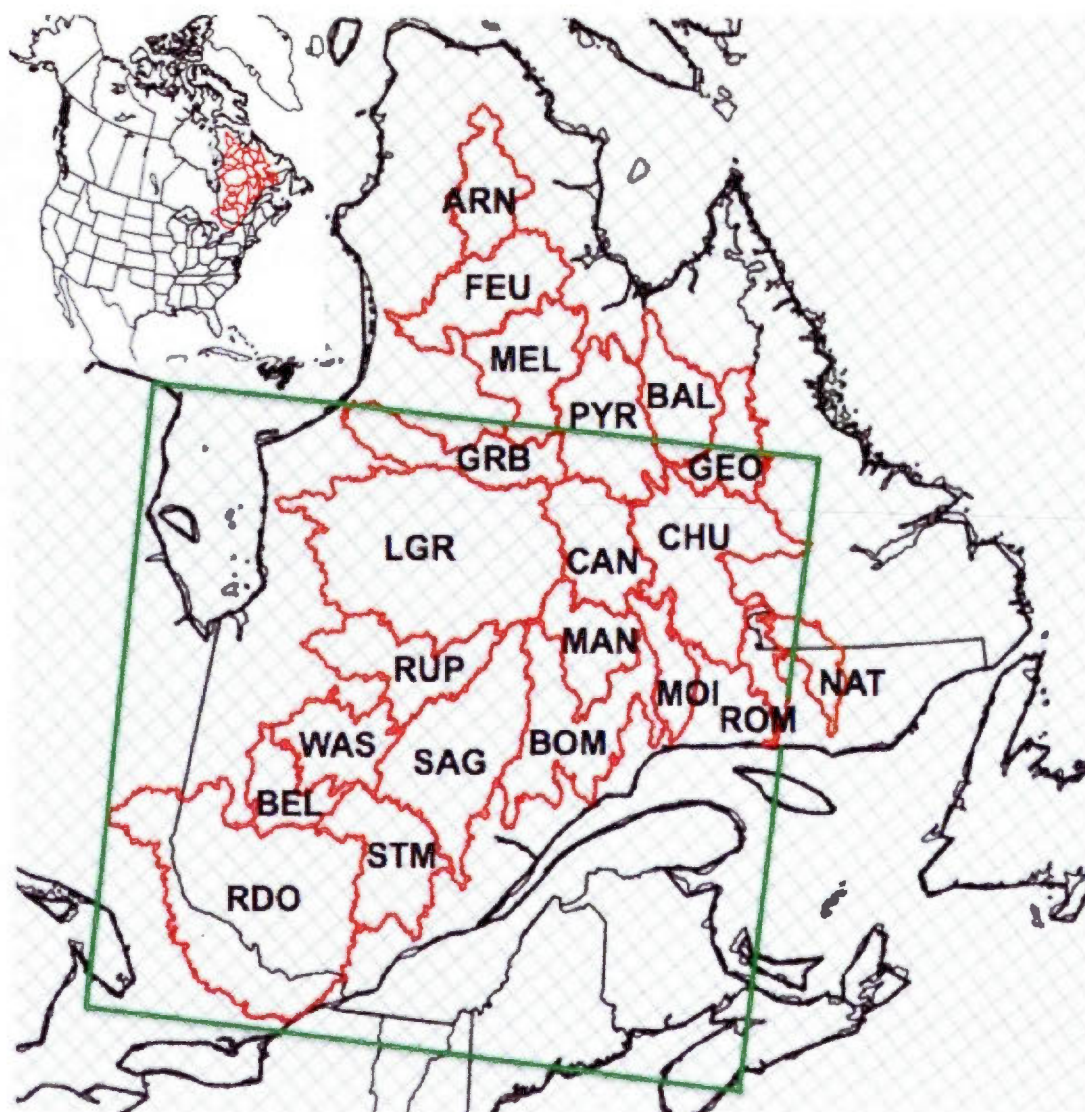


Figure 1 : Study region with its 21 watersheds (see Table 2 for details) overlaid with the reference grid. The domain of gridded observed daily precipitation data is shown in green. The inset shows the location of the study region in North America

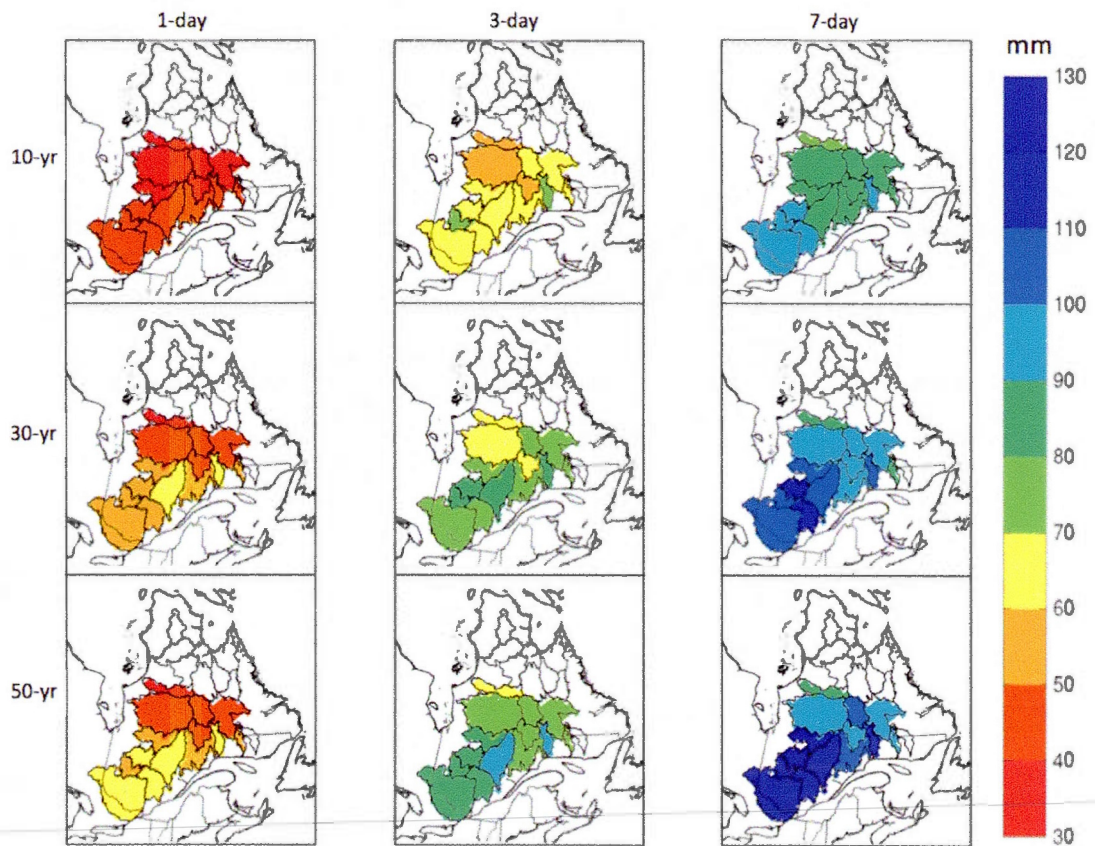


Figure 2 : Observed regional return levels (in mm) of 10-, 30- and 50-yr return period for 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for the reference 1980–2000 period for 14 of the 21 watersheds.

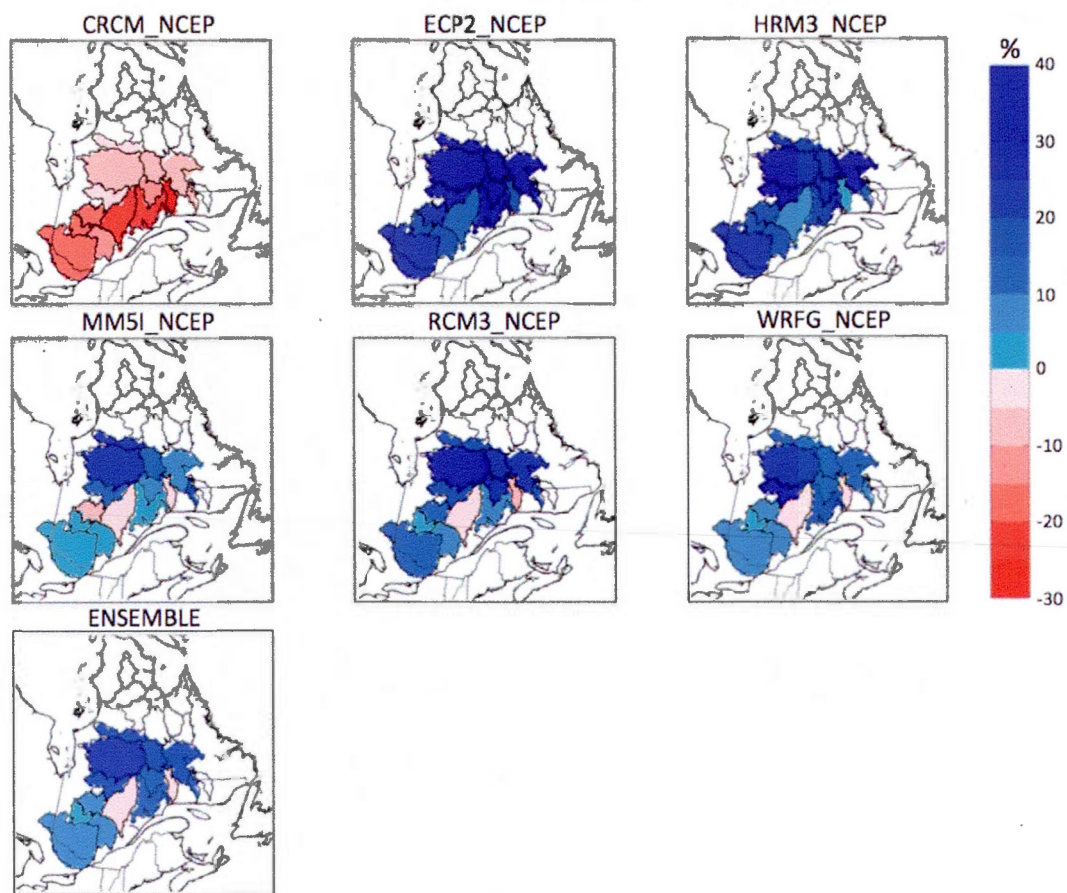


Figure 3 : Relative difference between $Q_{(1,10)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.

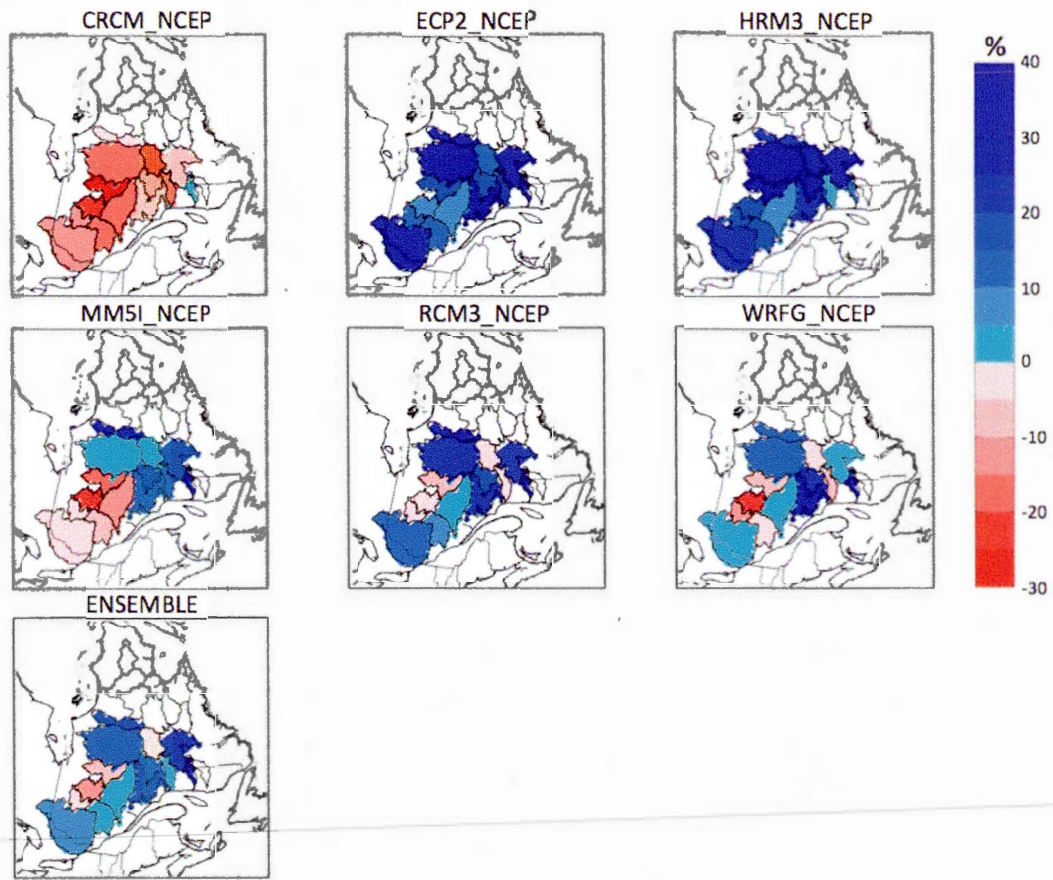


Figure 4 : Relative difference between $Q_{(7.50)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.

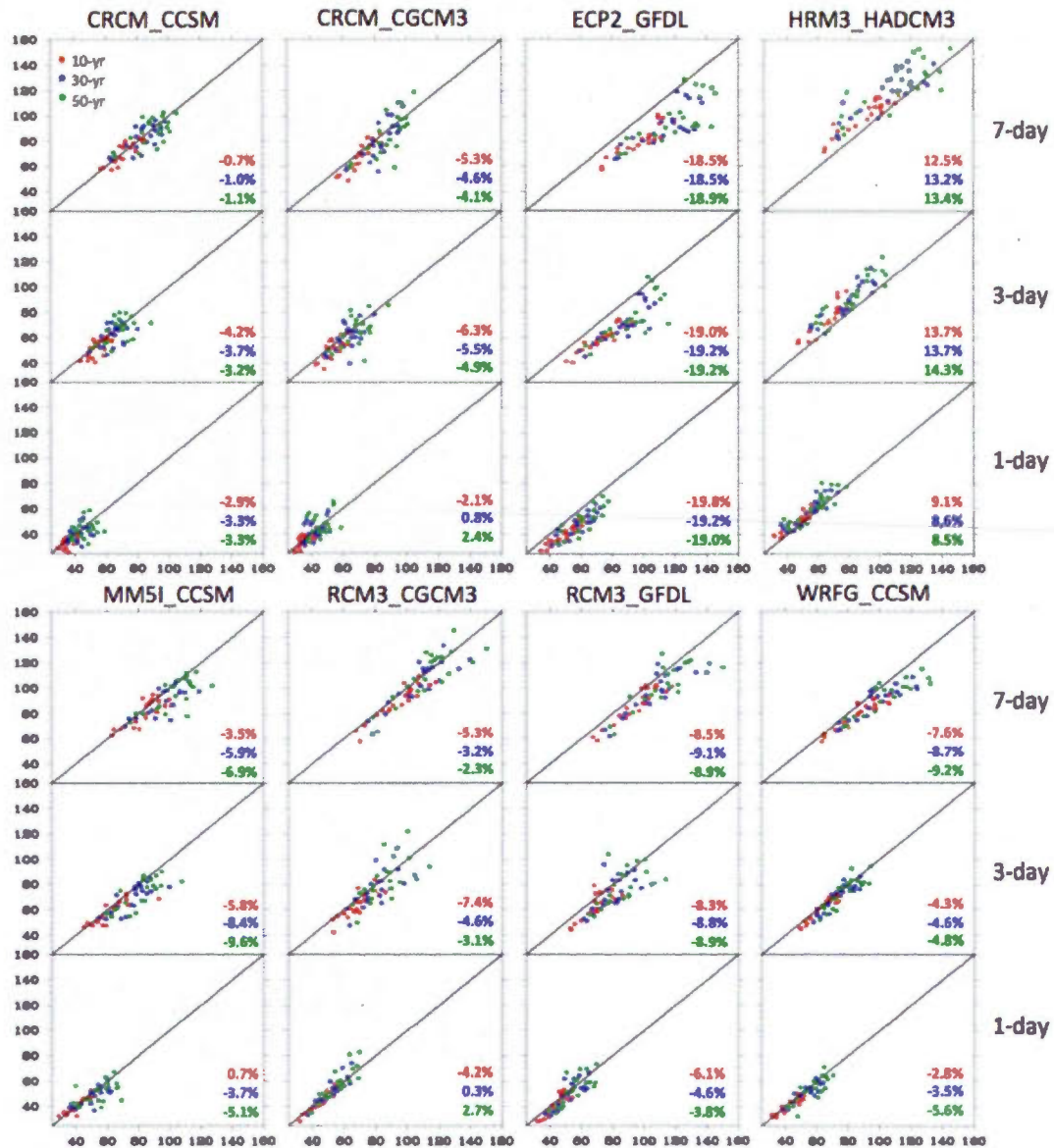


Figure 5: Scatter plots of 10- (red), 30- (blue) and 50-yr (green) return levels (in mm) of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for the 1980–2000 period. X-axis corresponds to NCEP driven RCM simulation, while y-axis corresponds to AOGCM driven simulation. Numbers in each panel represent average percentage difference between NCEP and AOGCM driven simulations.

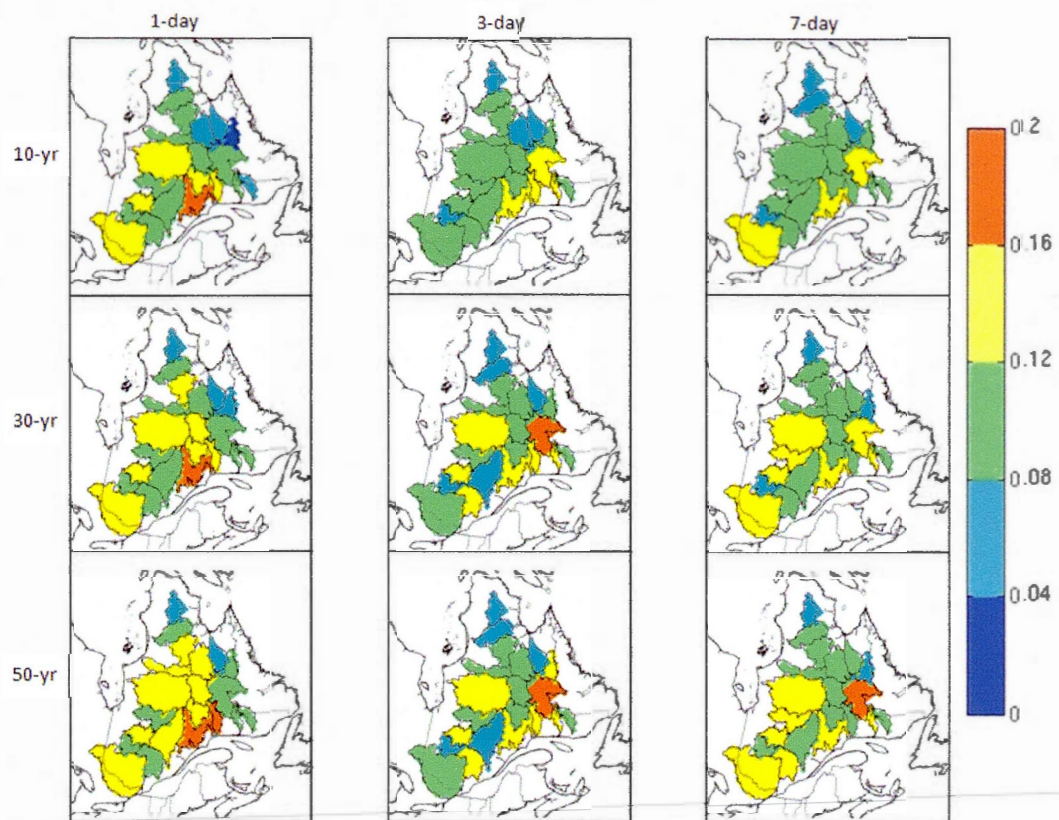


Figure 6 : Coefficient of variation of NCEP-driven RCM simulations for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.

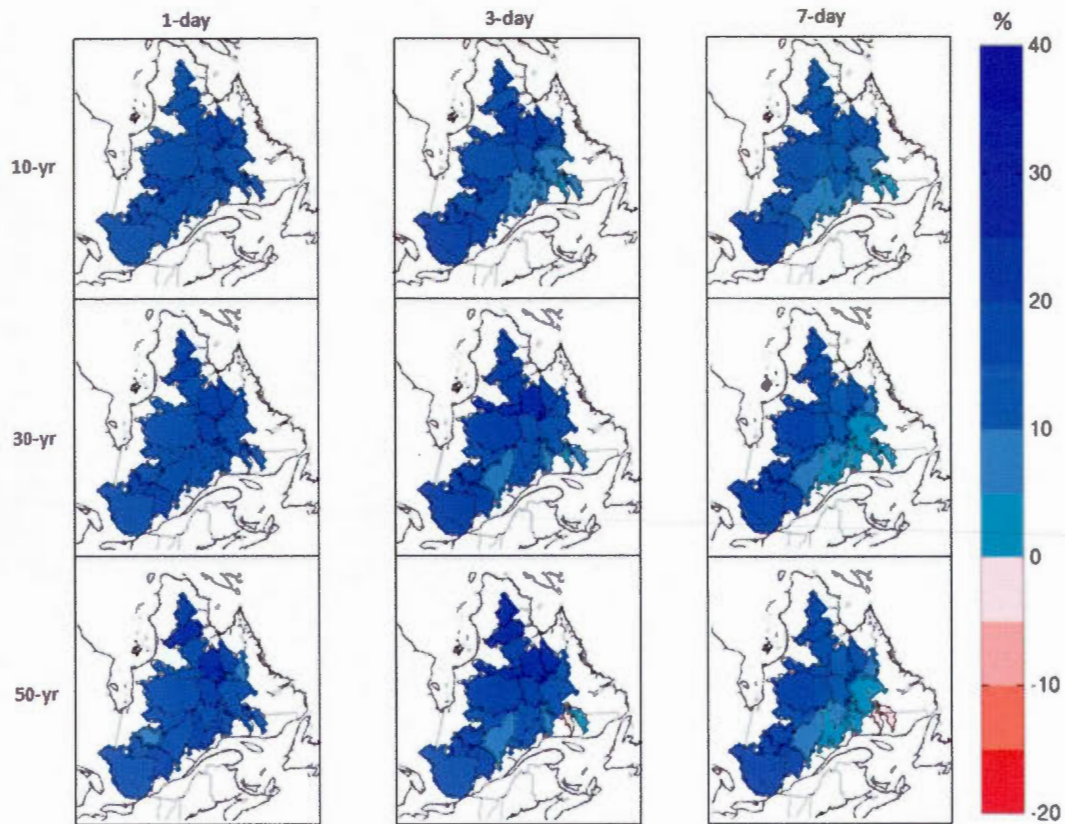


Figure 7 : Ensemble averaged projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period.

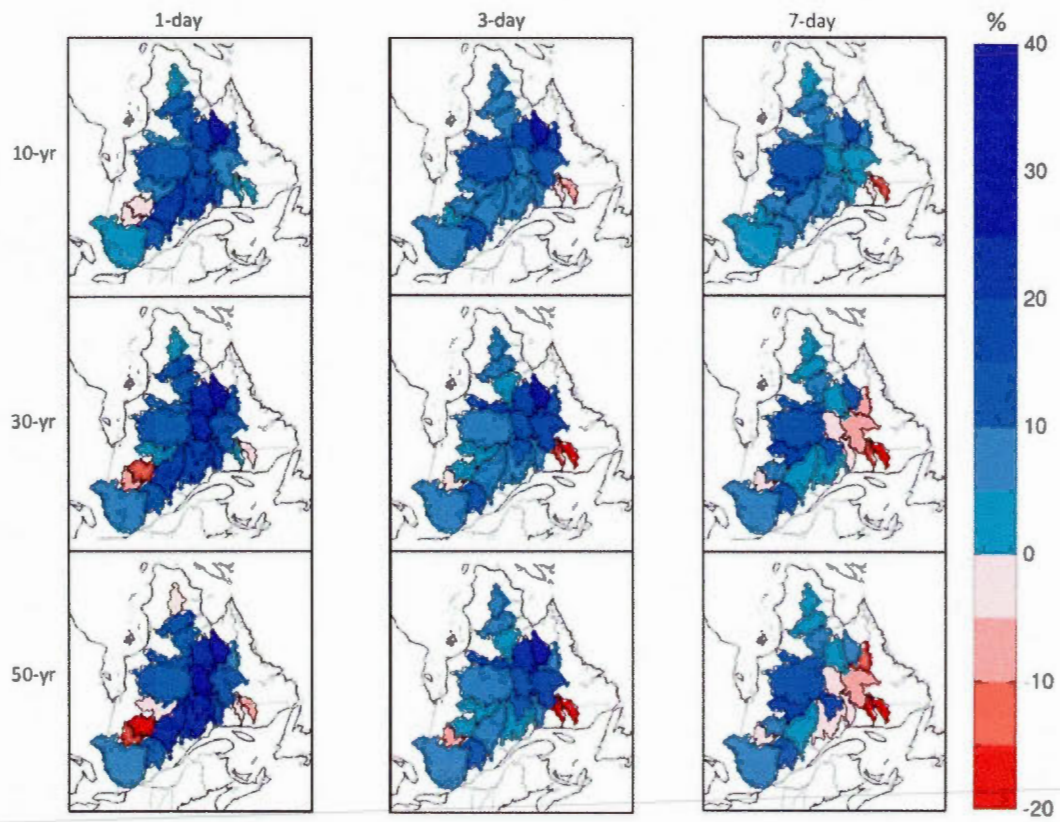


Figure 8 : Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CCSM.

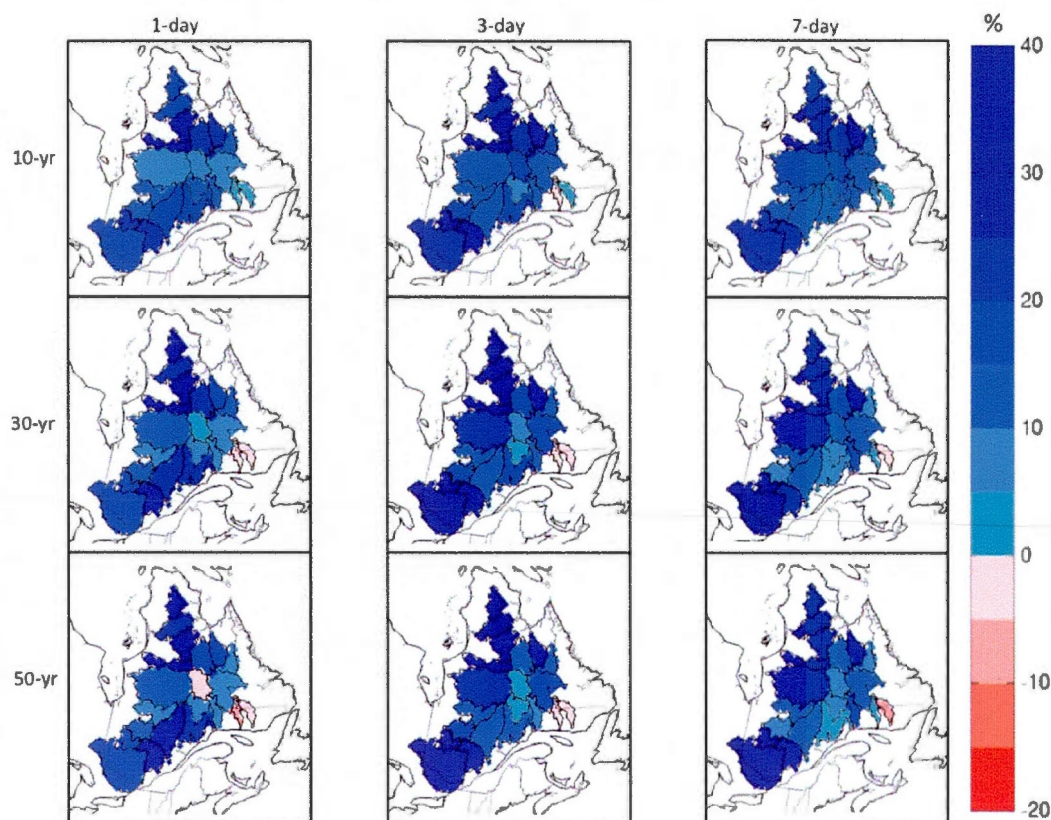


Figure 9 : Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CGCM3.

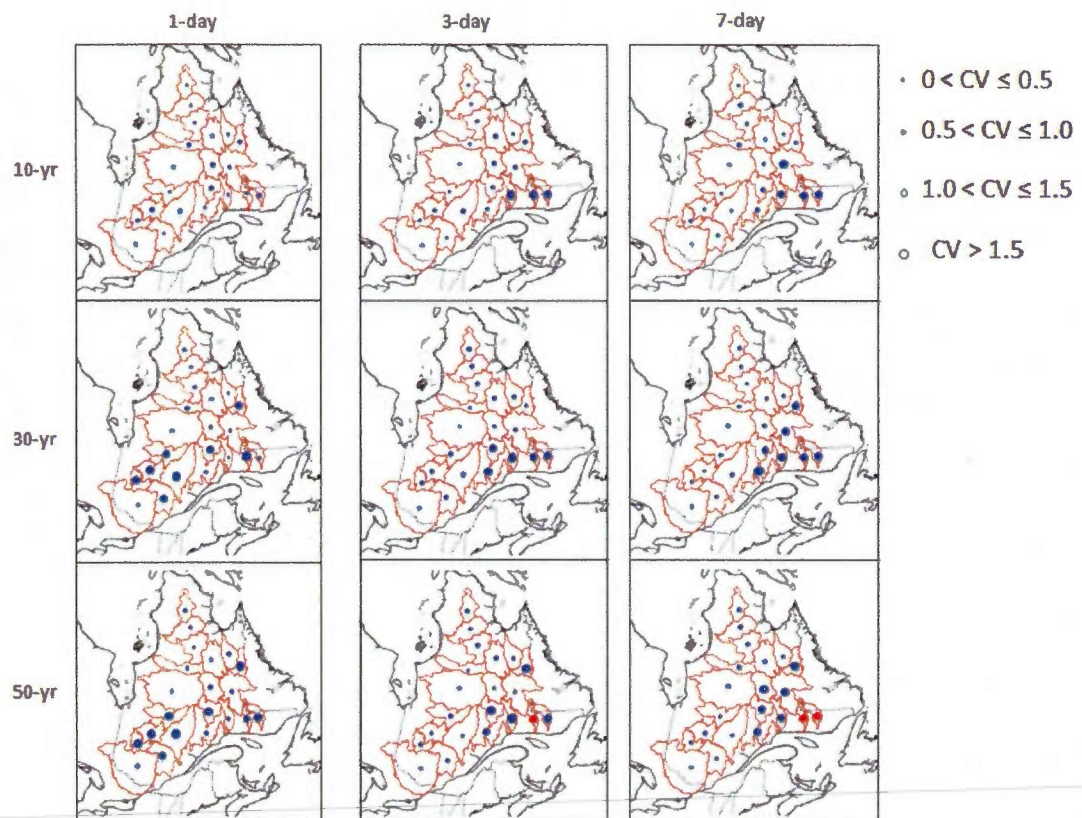


Figure 10 : Coefficient of variation of projected changes to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes based on the multi-RCM ensemble. Blue (red) dots are used for watersheds with positive (negative) projected ensemble averaged changes.

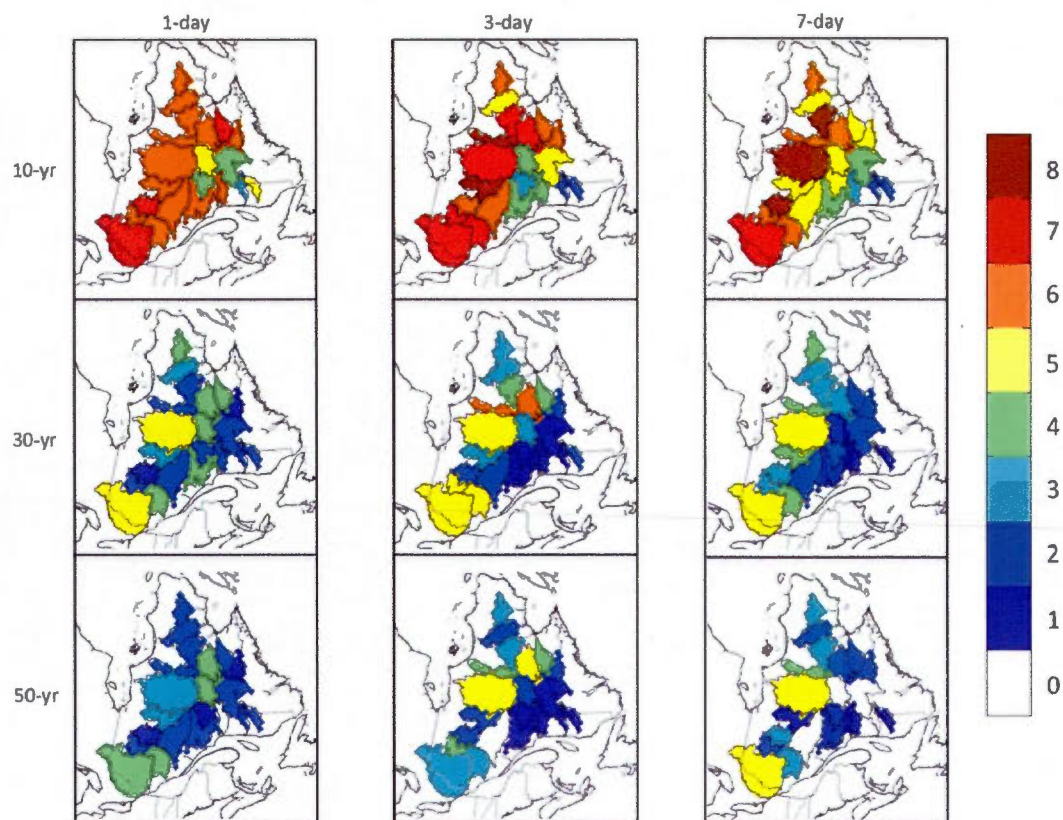


Figure 11 : Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 5% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.

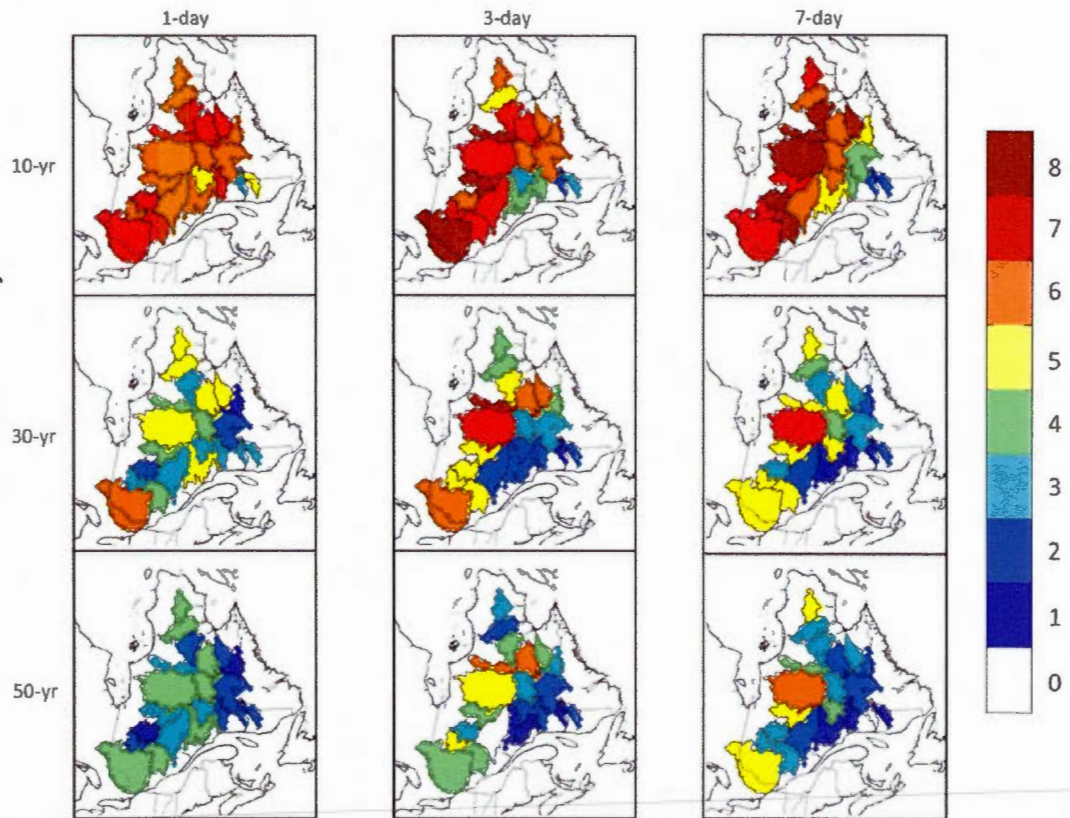


Figure 12 : Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 10% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3- and 7-day precipitation extremes.

TABLEAUX

Table 1 : Names and acronyms of six NARCCAP RCMs and details of AOGCM driven RCM simulations considered in this study.

RCM		AOGCM driven RCM simulations	
Name and modelling group	Acronym	AOGCM	Simulation acronym
Canadian Regional Climate Model (Ouranos)	CRCM	Canadian Global Climate Model, version 3: CGCM3	CRCM_CGCM3
		Community Climate Model, version 3: CCSM	CRCM_CCSM
Regional Climate Model 3 (University of California at Santa Cruz)	RCM3	CGCM3	RCM3_CGCM3
		Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model: GFDL	RCM3_GFDL
Hadley Regional Model 3 (Hadley Centre)	HRM3	Hadley Centre Climate Model, version 3: HadCM3	HRM3_HADCM3
Weather Research and Forecasting Model (Pacific Northwest National Laboratory)	WRFG	CCSM	WRFG_CCSM
MM5-PSU/NCAR Mesoscale Model (Iowa state University)	MM5I	CCSM	MM5I_CCSM
Experimental Climate Prediction Centre Regional Model (University of California at San Diego)	ECP2	GFDL	ECP2_GFDL

Table 2 : Description of the 21 watersheds used in the study.

Watershed	Abbreviated name	Area (km ²)
Rivière Arnaud	ARN	26,872
Rivière à la Baleine	BAL	29,895
Rivière Bell	BEL	22,237
Complexe Bersimis-Outardes-Manic	BOM	58,168
Réservoir Caniapiscou	CAN	37,566
Réservoir Chutes Churchill	CHU	69,631
Rivière aux Feuilles	FEU	42,068
Rivière George	GEO	24,158
Grande Rivière de la Romaine	GRB	34,314
Complexe La Grande Rivière Sud	LGR	140,373
Réservoir Manicouagan	MAN	29,342
Rivière aux Melzèzes	MEL	40,623
Réservoir Moise	MOI	19,100
Rivière Natashquan	NAT	15,468
Rivière Canispiscou	PYR	48,430
Rivière des Outaouais	RDO	143,240
Rivière Romaine	ROM	13,211
Rivière Rupert	RUP	41,114
Lac Saint-Jean	SAG	72,678
Rivière St-Maurice	STM	42,842
Rivière Waswanapi	WAS	31,691

Table 3 : Percentage of stastically significant changes for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 1-, 3-, and 7-day precipitation extremes at the 95% level (90% level in parenthesis).

Return period	Precipitation duration		
	1-day	3-day	7-day
10-year	75 (79)	37 (49)	29 (37)
30-year	72 (76)	44 (55)	34 (43)
50-year	69 (77)	37 (51)	28 (41)

CHAPITRE III

CONCLUSION

Cette étude avait pour but d'estimer les changements appréhendés dans la fréquence et l'amplitude des événements de précipitations extrêmes en utilisant les simulations d'un ensemble de multi-modèles régionaux du climat (MRC) provenant du projet NARCCAP. Les changements appréhendés ont été analysés par chacun des MRC individuellement ainsi que par la moyenne d'ensemble sans poids de ceux-ci. En plus des différentes simulations provenant du projet NARCCAP, l'étude comprenait des données d'observation provenant des stations météorologiques d'Environnement Canada moyennées et interpolées au niveau du grillage de référence de cette étude pour 14 des 21 bassins de cette étude.

D'une durée de 1, 2, 3, 5, 7 et 10 jours, les changements dans les quantités maximales de précipitations saisonnières (mai à octobre) ont été étudiées pour les périodes de référence (1971-2000) et du futur (2041-2070) à l'aide de l'analyse fréquentielle régionale (ARF) basée sur les L-moments. La période couverte par les mois de mai à octobre maximisait la durée des précipitations de pluie sur la grande majorité du Québec avec le moins de précipitation solide possible. Ceci a permis ainsi de préserver l'unicité dans les caractéristiques physiques des précipitations.

Afin d'évaluer la performance des différents MRC, les niveaux de retour des simulations de validation (MRC piloté par les ré-analyses NCEP) ont été d'abord comparés à ceux provenant des données d'observations pour les 14 bassins avec des données d'observation. Puis, les différences liées au choix des conditions aux frontières ont été analysées en comparant les niveaux de retours des simulations de validation (conditions aux frontières de type ré-analyse) avec ceux pilotés par les données modélisées des MCG.

Finalement, les niveaux de retours des précipitations extrêmes dans un climat futur (2041-2070) ont été comparés avec ceux présents dans un climat de référence (1971-2000) en utilisant simulations des MRC pilotés par les MCG.

Pour utiliser la méthode d'ARF, il a fallu déterminer si les 21 bassins versants à l'étude étaient statistiquement homogènes à l'aide du test proposé par Hosking et Wallis. Les 14 bassins versants ayant des données d'observation ont tous satisfaits le critère d'homogénéité tout comme les 7 autres bassins versants sans observation où les données des simulations de validation ont été utilisées en remplacement. En fait, 20 des 21 bassins versants ont eu la plus haute mention, 'définitivement homogène', alors que seulement le bassin STM a eu la mention 'possiblement hétérogène'. Après comparaison et analyse, la distribution GEV s'est avérée comme étant la plus efficace pour modéliser les précipitations extrêmes et a donc été utilisée pour l'entièreté de l'étude. Les niveaux de retours ont ainsi pu être calculés en fonction des trois périodes de retours (10, 30 et 50 années) choisies.

Les niveaux de retours calculés à l'aide des données d'observation ont montré que les plus grandes amplitudes se retrouvent dans le sud du Québec dans l'axe du fleuve St-Laurent et diminuent progressivement en se dirigeant vers les bassins versants nordiques. Ce constat a été aussi perceptible par la majorité des simulations de validation et tout comme celles pilotées par les MCG. Pour les différentes combinaisons de durée et de période de retour, la différence entre les deux extrêmes des niveaux de retour provenant des observations se situe généralement entre 25 et 35 %.

L'évaluation de la différence entre les niveaux de retour des simulations de validation et des données d'observation a montré une disparité notable. La majorité des simulations surestiment les niveaux de retours des observations, sauf pour le CRCM qui les sous-estime presque systématiquement. Le modèle WRFG s'est avéré comme étant celui qui se rapprochait le plus des niveaux de retours des observations avec un écart moyen en valeur absolue de 8,6% par rapport aux niveaux de retours des observations pour les 14 bassins et 9 combinaisons possibles. WRFG est suivi par MM5I (11,1%), RCM3 (12,9%), HRM3 (14,5%), CRCM (16,9%) et ECP2 (20,1%). Ensuite, une comparaison entre les niveaux de

retours provenant des observations avec la moyenne sans poids des six simulations de validation a été effectuée. L'écart moyen en valeur absolue calculé a été de 9.3%, ce qui est un tantinet supérieur au résultat du meilleur modèle individuel. Ceci est explicable par la grande variabilité présente entre les différents modèles. Même si la différence avec les niveaux de retours des observations n'est visiblement pas inférieure aux résultats des modèles individuellement, la moyenne d'ensemble, par sa définition, est davantage représentative prenant en compte les incertitudes liées à l'utilisation d'un MRC.

Ensuite, le fait d'utiliser des conditions aux frontières avec des données de type ré-analyses au lieu de données provenant d'un MCG a été évalué. Dans la majorité des cas, cette différence est en moyenne inférieure à 10%. Toutefois, de plus grandes différences pouvant atteindre jusqu'à plus de 30% ont été obtenues particulièrement pour les longues périodes de retour. Les plus petites différences ont été perceptibles pour WRFG, alors que pour ECP2 les différences étaient les plus élevées.

Afin de vérifier l'incertitude liée à la structure des MRC (chacun des MRC piloté par les ré-analyses NCEP), l'outil statistique CV (quotient de l'écart-type sur la moyenne) a été utilisé permettant de quantifier la disparité sans dimension. Les résultats ont montré un bon niveau de confiance dans la majorité de cas. La confiance était cependant plus grande pour les bassins nordiques comparativement aux bassins au sud-est du Québec. Similairement, la période de retour de 10 années est liée avec une plus grande confiance comparativement à la période de retour de 50 années.

Finalement, les changements appréhendés des niveaux de retours des précipitations extrêmes ont été calculés pour chacun des modèles et l'ensemble des multi-MRC (moyenne sans poids des huit simulations disponibles). Dans pratiquement tous les cas, les modèles prévoient une augmentation des précipitations extrêmes. Pour la moyenne d'ensemble des huit simulations disponibles, une augmentation des niveaux de retour a été constatée dans la presque totalité des bassins et combinaisons de durée et période de retour. En moyenne, l'augmentation appréhendée a été de 13%. Les bassins nordiques sont liés avec les plus

grandes augmentations (16 à 18%), alors que les plus petites augmentations ont été perceptibles pour les bassins au sud-est du Québec (5 à 9%).

Ces différentes augmentations ont ensuite été analysées afin de savoir si celles-ci étaient statistiquement significatives à l'aide d'intervalles de confiance calculés avec la méthode du vecteur *bootstrap*. Pour ce faire, si, pour les deux périodes à l'étude, les intervalles de confiance ne se superposaient pas l'une sur l'autre, le changement était dit significativement significatif. Dans tous les cas, seules les augmentations ont été suffisantes pour s'assurer du statut de changement significatif avec un niveau de confiance de 95%. Les résultats ont montré que les bassins du sud-est du Québec sont systématiquement ceux avec le moins grand nombre de simulations suggérant un changement significatif comparativement au reste du Québec. De plus, en général, plus la période de retour était de longue durée, moins le nombre de simulations avec des changements significatifs était important.

Une mesure de la disparité a finalement été effectuée sur la différence entre les niveaux de retours des périodes future (2041-2070) et courante (1971-2000) à l'aide de l'outil statistique CV. En fait, cet outil a permis d'évaluer la confiance dans les changements appréhendés. Ainsi, les bassins nordiques se sont avérés comme étant les bassins avec la plus grande confiance dans leurs changements appréhendés ayant des valeurs de CV petites dans la majorité des combinaisons de durée-période de retour. En contrepartie, la confiance dans les résultats des bassins au sud-est du Québec est beaucoup moins importante en raison des grandes valeurs de CV présentes pour ces bassins, spécialement pour les longues périodes de retour. La confiance pour l'ensemble des bassins diminue sensiblement avec les longues périodes de retour. Ce constat est moins perceptible en ce qui a trait aux différentes durées de l'étude.

En résumé, cette étude a montré que les bassins nordiques ont les plus grands changements dans les niveaux de retours entre les deux périodes, que ceux-ci sont pour la plupart significatifs et qu'il subsiste une confiance substantielle dans ces changements. De l'autre côté, les bassins au sud-est du Québec sont ceux avec les plus petites différences entre les deux périodes, avec les plus petits nombres de simulations suggérant une augmentation

significative et avec la plus grande disparité entre les différentes simulations. Pour les régions avec les plus grandes augmentations de précipitations extrêmes, il sera important que les municipalités, gouvernements et entrepreneurs prennent les mesures nécessaires afin d'être prémuni face à ces changements, comme dans l'élaboration des nouveaux barrages hydro-électrique et systèmes d'égouts et pluviaux.

Le fait d'avoir utilisé un ensemble de multi-MRC a permis d'augmenter la fiabilité et la consistance dans les projections effectuées. De fait, à l'aide de la panoplie de simulations disponibles, la quantification des diverses incertitudes et du niveau de confiance dans les résultats est devenue possible. Il est clair qu'une analyse sur les changements appréhendés des précipitations extrêmes ou de n'importe quelle variable météorologique devrait se faire avec la plus grande quantité de modèles possibles ayant le plus grand nombre de variation à l'intérieur de ceux-ci. Par exemple, dans cette étude, idéalement, des simulations pour chaque MRC ayant été piloté par tous les MCG (au lieu de 1 ou 2 comme ce l'est présentement) auraient amélioré la caractérisation de la sensibilité du MRC au choix du pilotage avec un MCG. De manière analogue, la caractérisation de la sensibilité du pilotage avec un MCG sur les différents MRC aurait pu devenir possible. Aussi, l'utilisation de différentes résolutions, de différents scénarios et types de paramétrages à l'intérieur même des MRC aurait permis d'en connaître davantage sur leur sensibilité interne. D'un autre côté, dans un monde idéal, il est souhaitable que le domaine ayant des données d'observation s'agrandisse afin que tous les bassins de l'étude soit couverts par celles-ci permettant ainsi l'évaluation de la performance des MRC sur tout le domaine. Finalement, avec des MRC ayant une meilleure résolution, une meilleure représentation de la variabilité spatiale des sols et de la végétation est possible, améliorant ainsi substantiellement la précision dans les résultats, particulièrement pour les bassins avec de grandes variations topographiques sur leur domaine.

Il est important de noter que le réseau des stations d'observations n'est pas uniforme sur tout son domaine. De fait, la concentration y est beaucoup plus importante dans le sud du Québec, celle-ci diminuant de plus en plus en se dirigeant vers les latitudes plus nordiques. Il a été démontré qu'un réseau d'observation clairsemé peut amener d'importantes incertitudes lorsqu'interpolé sous forme de points de grille. Ceci a donc pu avoir des conséquences sur la

qualité de l'uniformité des données d'observations et, par le fait même, sur l'évaluation de la performance des différents MRC. L'utilisation de l'ARF a permis d'avoir une plus grande confiance dans les résultats obtenus spécialement pour les plus longues périodes de retour. Cependant, la taille des échantillons, la topographie à l'intérieur des différents bassins versants et l'interpolation des simulations sont toutes des facteurs qui ont pu influencer les résultats. Tout cela devrait être tenu en compte, spécialement dans l'optique d'une interprétation judicieuse des conclusions de cette recherche.

ANNEXE A

FIGURES SUPPLÉMENTAIRES N'AYANT PAS ÉTÉ PRÉSENTÉES DANS L'ARTICLE, MAIS DISCUTÉES DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT

A.1	Sous-section 2.4.1 Statistical homogeneity analysis
A.2	Sous-section 2.4.2 Performance and boundary forcing errors
A.3	Sous-section 2.4.2 Performance and boundary forcing errors
A.4	Sous-section 2.4.2 Performance and boundary forcing errors
A.5	Sous-section 2.4.2 Performance and boundary forcing errors
A.6	Sous-section 2.4.3 RCMs structural and AOGCM related uncertainties
A.7	Sous-section 2.4.4 Projected changes
A.8	Sous-section 2.4.4 Projected changes
A.9	Sous-section 2.4.4 Projected changes
A.10	Sous-section 2.4.4 Projected changes
A.11	Sous-section 2.4.4 Projected changes
A.12	Sous-section 2.4.4 Projected changes

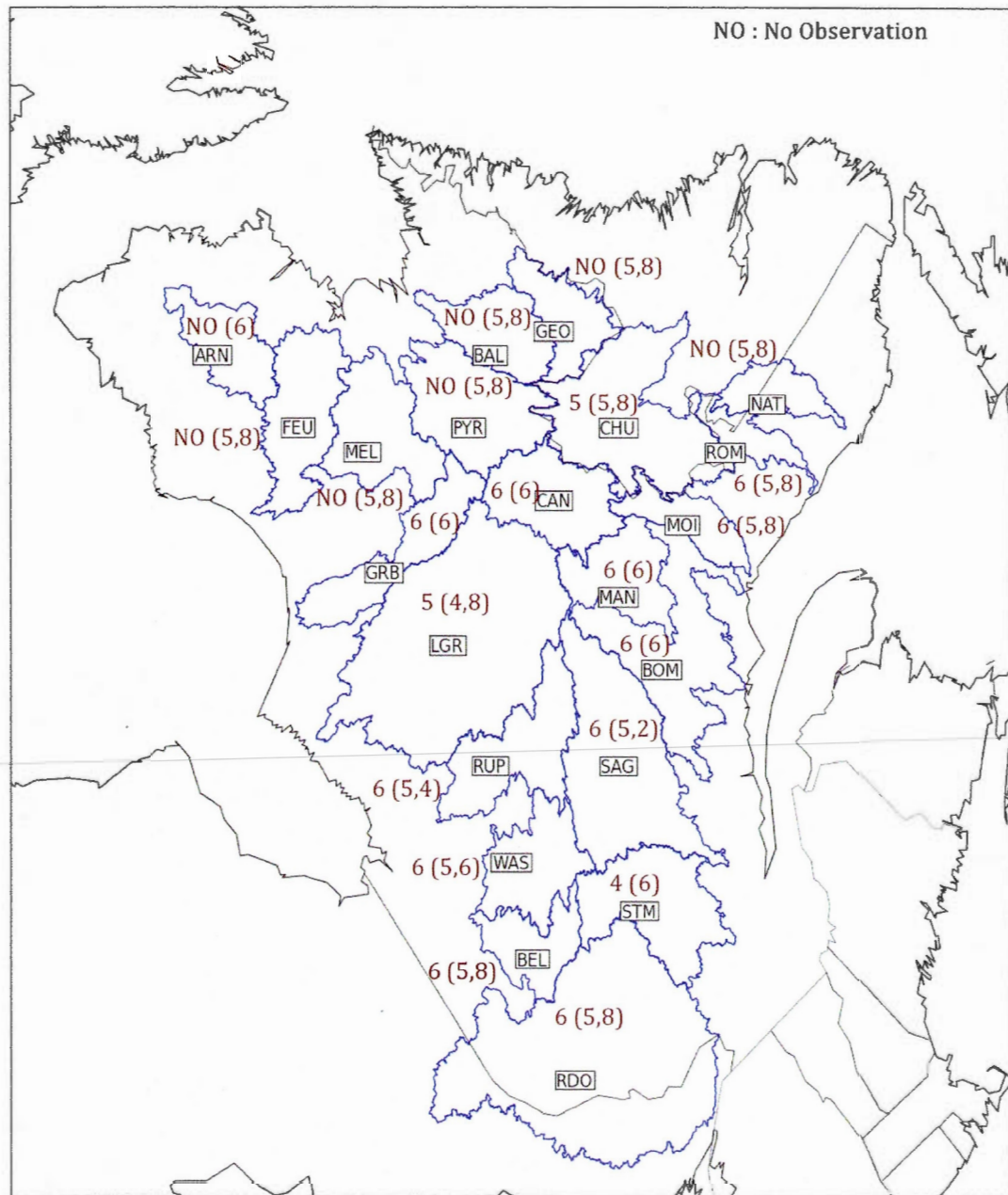


Figure A. 1 : Number of extreme precipitation duration cases, out of six (i.e. 1-, 2-, 3-, 5-, 7-, and 10-day precipitation extremes), for which a basin is found homogeneous using the observed data. Same information for the case of six RCM_NCEP simulations is shown in brackets.

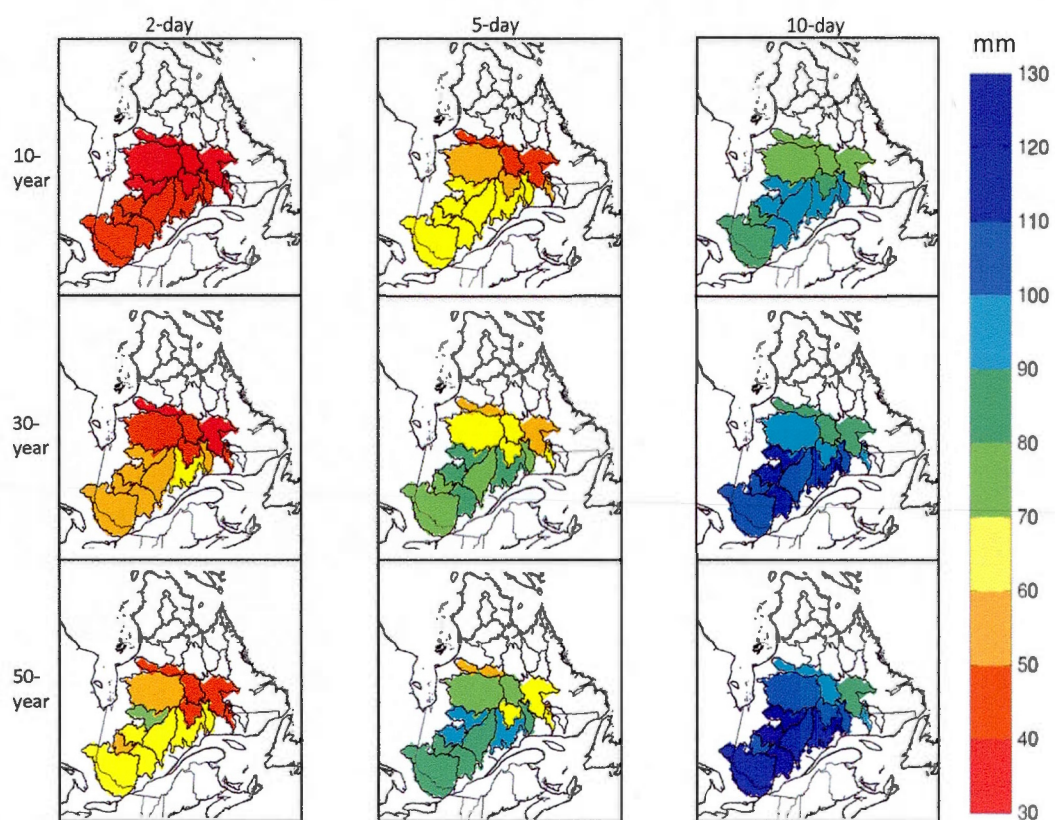


Figure A. 2 : Observed regional return levels (in mm) of 10-, 30- and 50-yr return period for 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for the reference 1980–2000 period for 14 of the 21 watersheds.

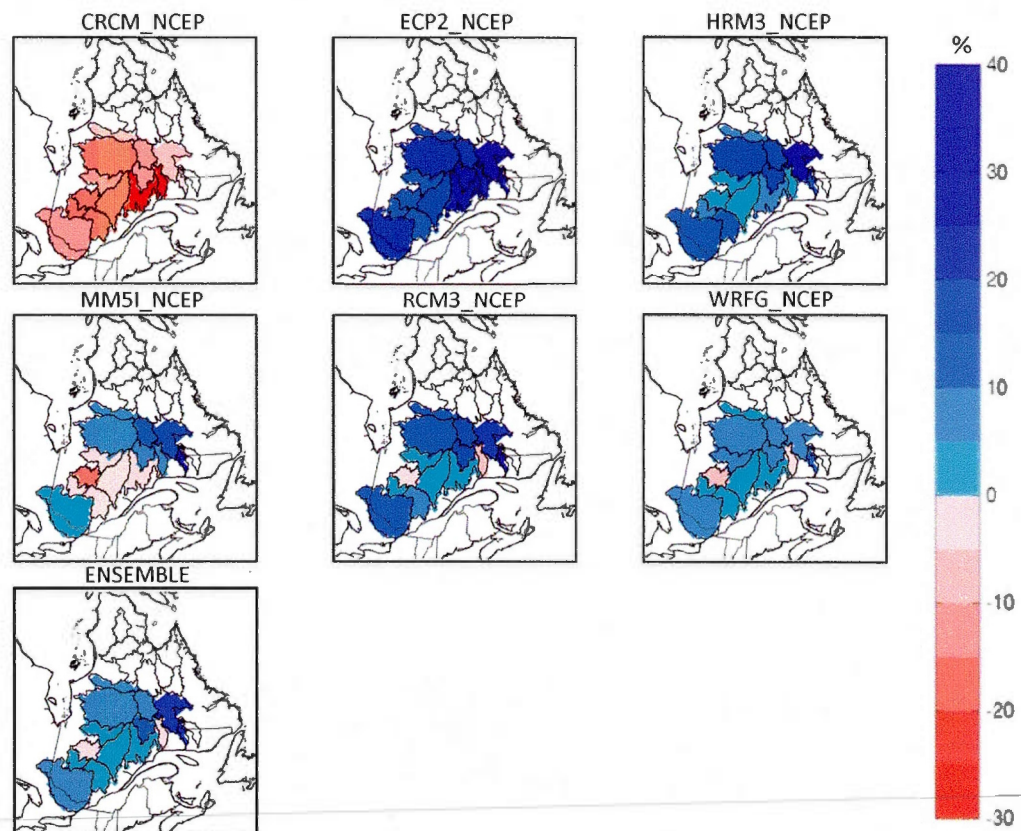


Figure A. 3: Relative difference between $Q_{(2,10)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.

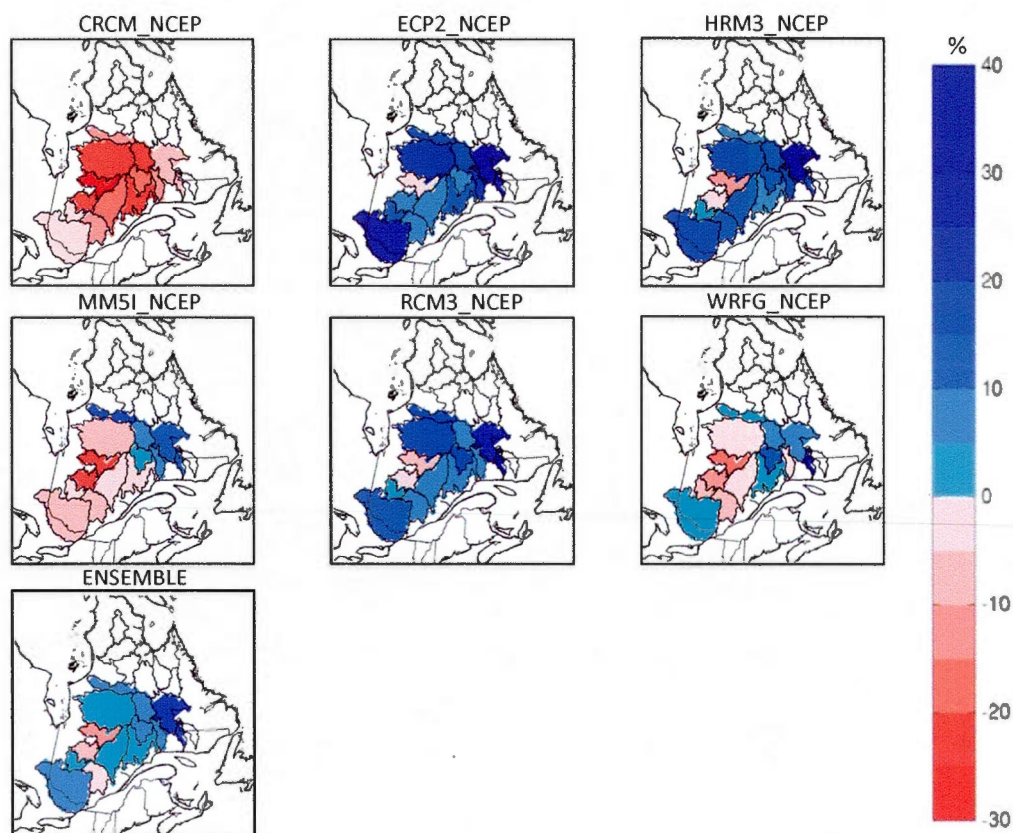


Figure A. 4 : Relative difference between $Q_{(10,50)}$ derived from NCEP-driven RCM simulations and observed dataset for 14 of the 21 watersheds for the reference 1980-2000 period. Ensemble averaged differences are also shown.

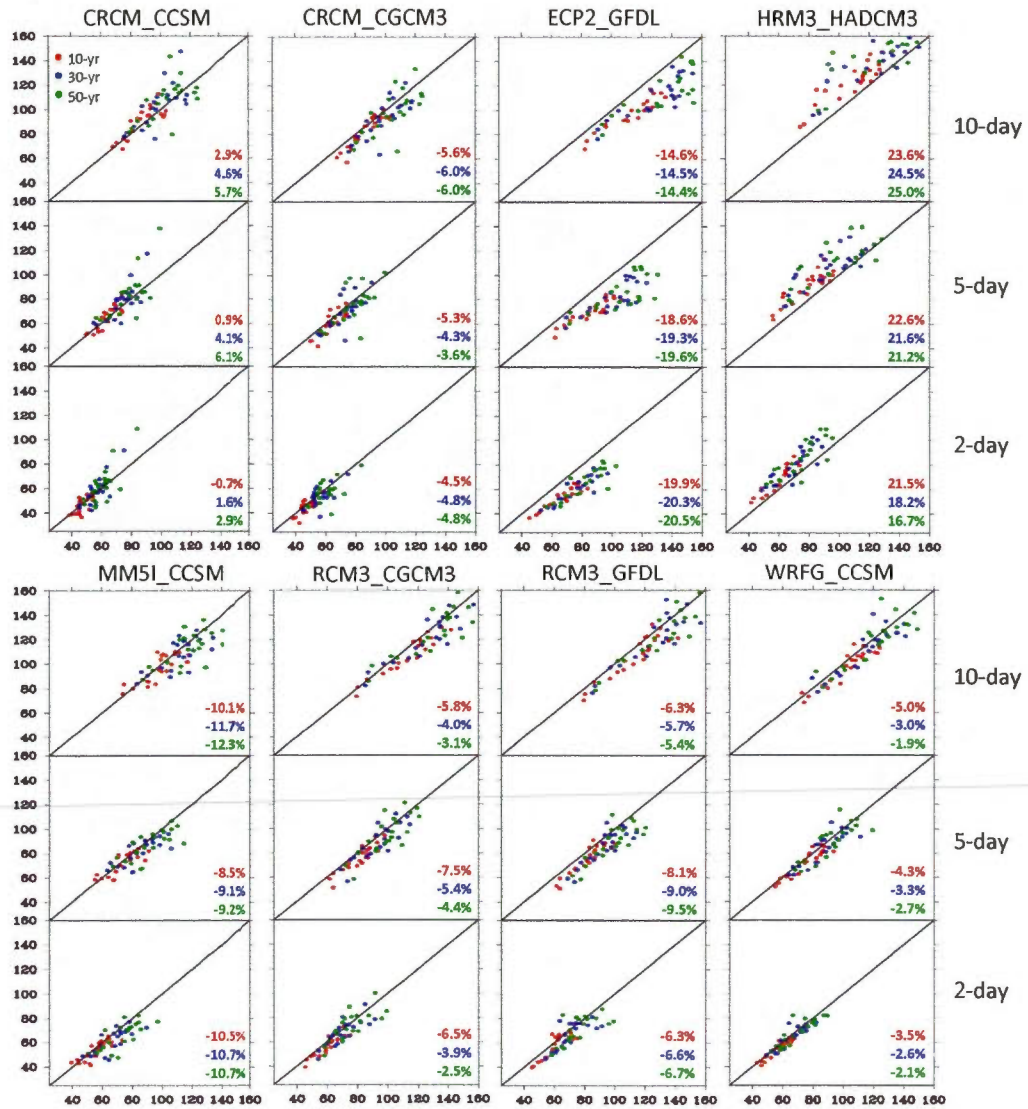


Figure A. 5 : Scatter plots of 10- (red), 30- (blue) and 50-yr (green) return levels (in mm) of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for the 1980–2000 period. X-axis corresponds to NCEP driven RCM simulation, while y-axis corresponds to AOGCM driven simulation. Numbers in each panel represent average percentage difference between NCEP and AOGCM driven simulations.

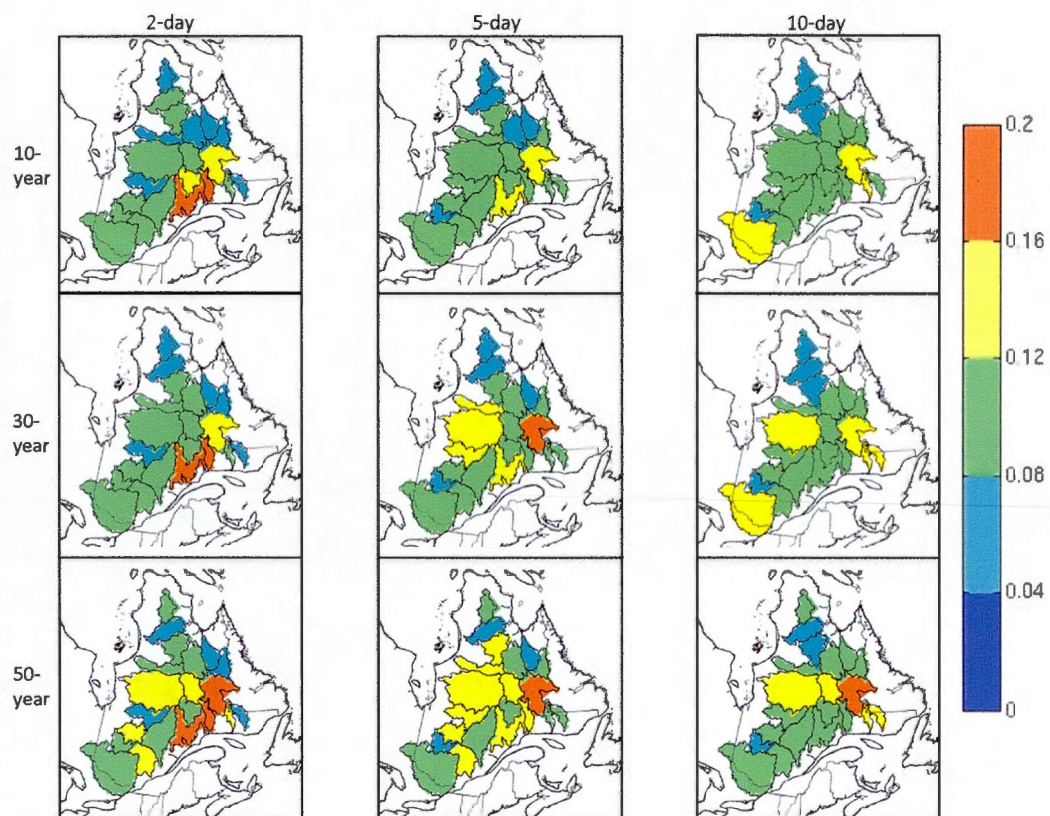


Figure A. 6 : Coefficient of variation of NCEP-driven RCM simulations for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.

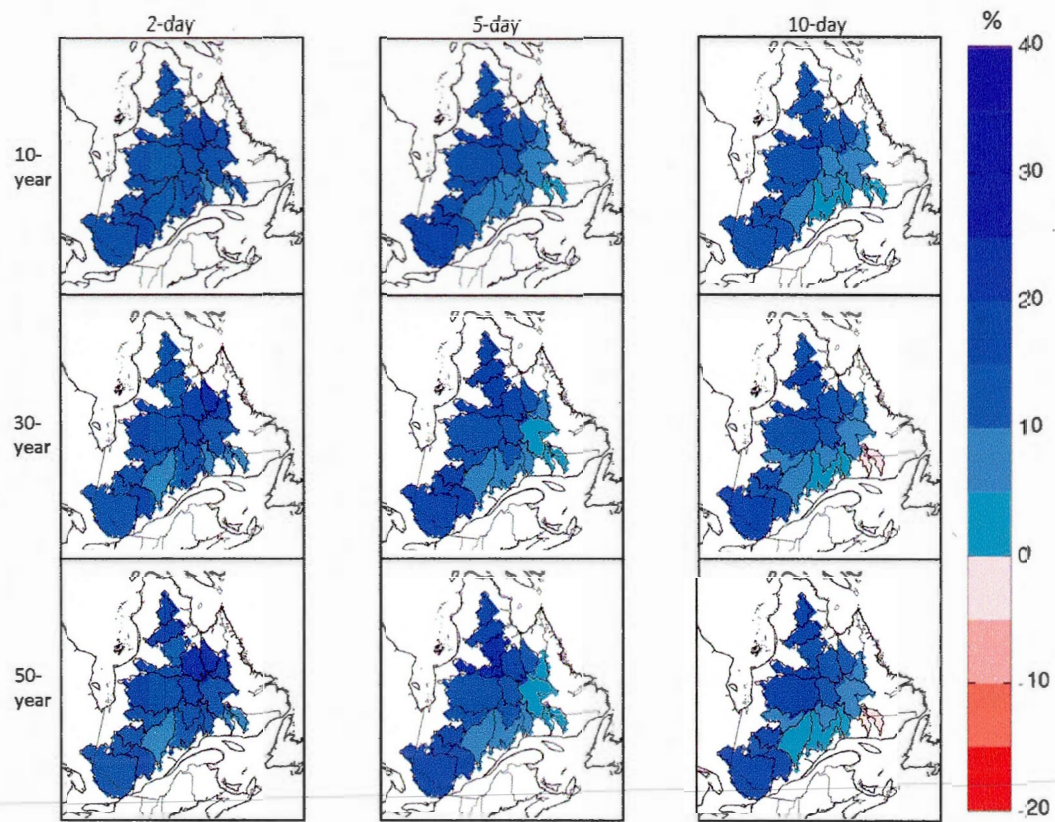


Figure A. 7 : Ensemble averaged projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period.

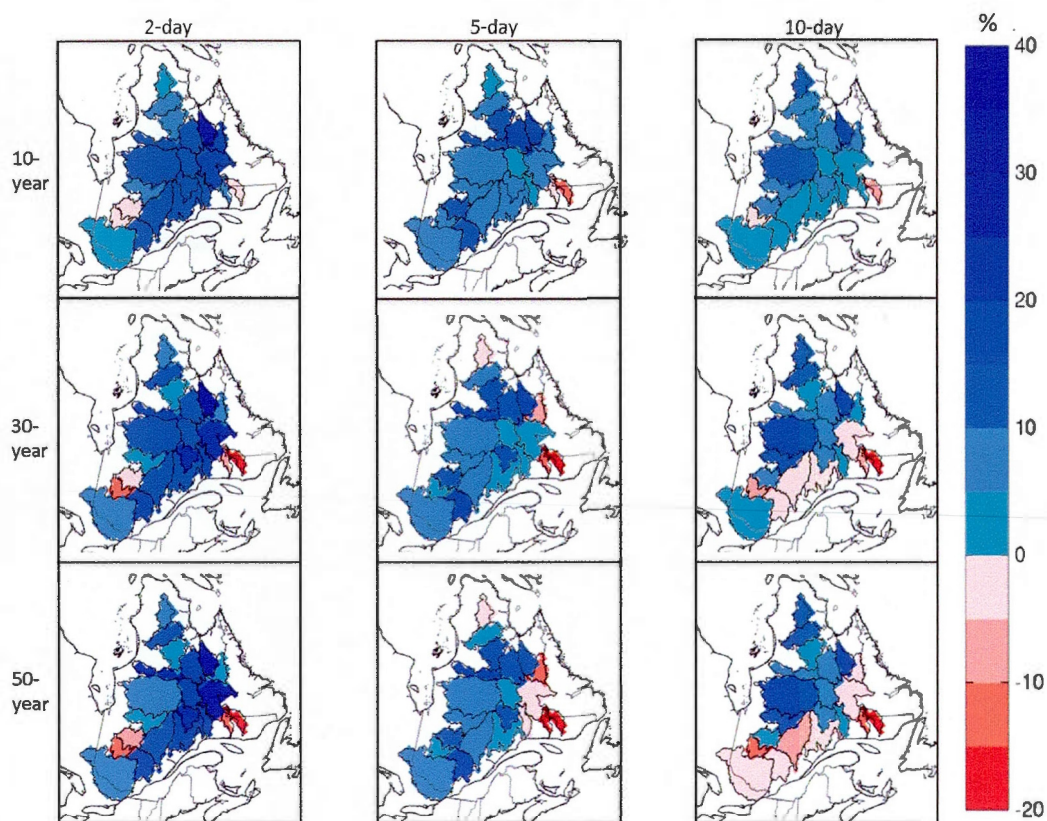


Figure A. 8 : Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CCSM.

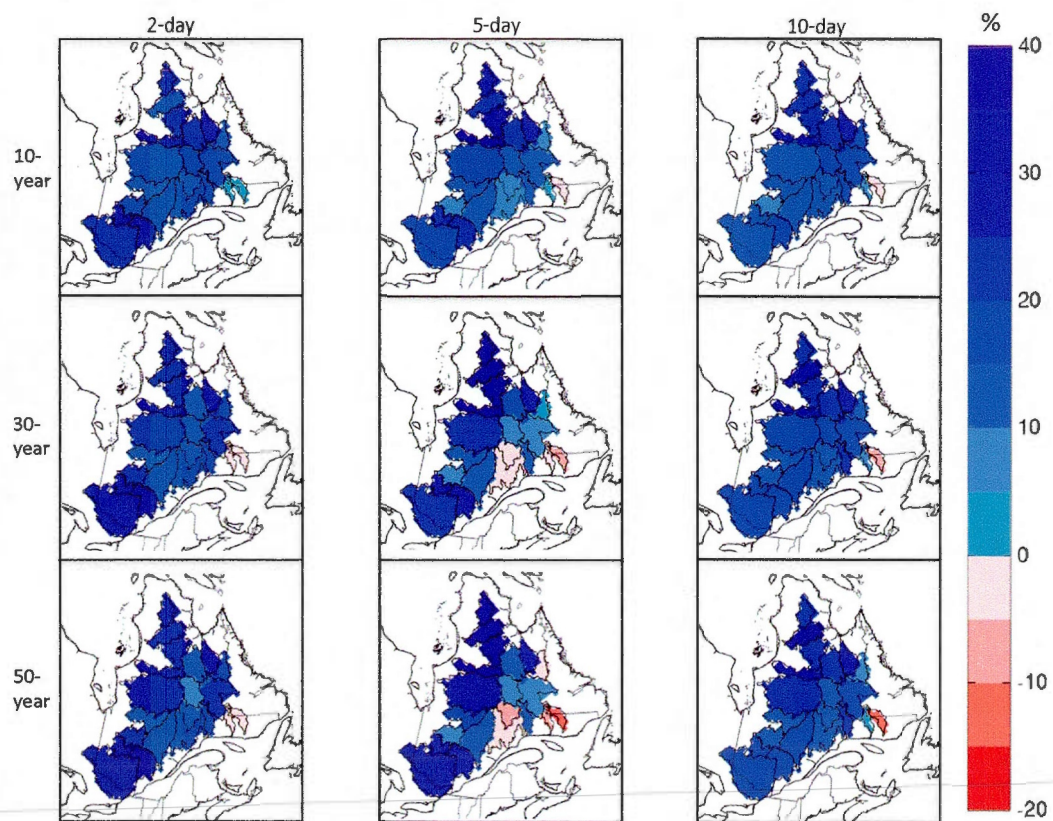


Figure A. 9: Projected changes (in %) to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes for future 2041–2070 period with respect to the current 1971–2000 period for CRCM_CGCM3.

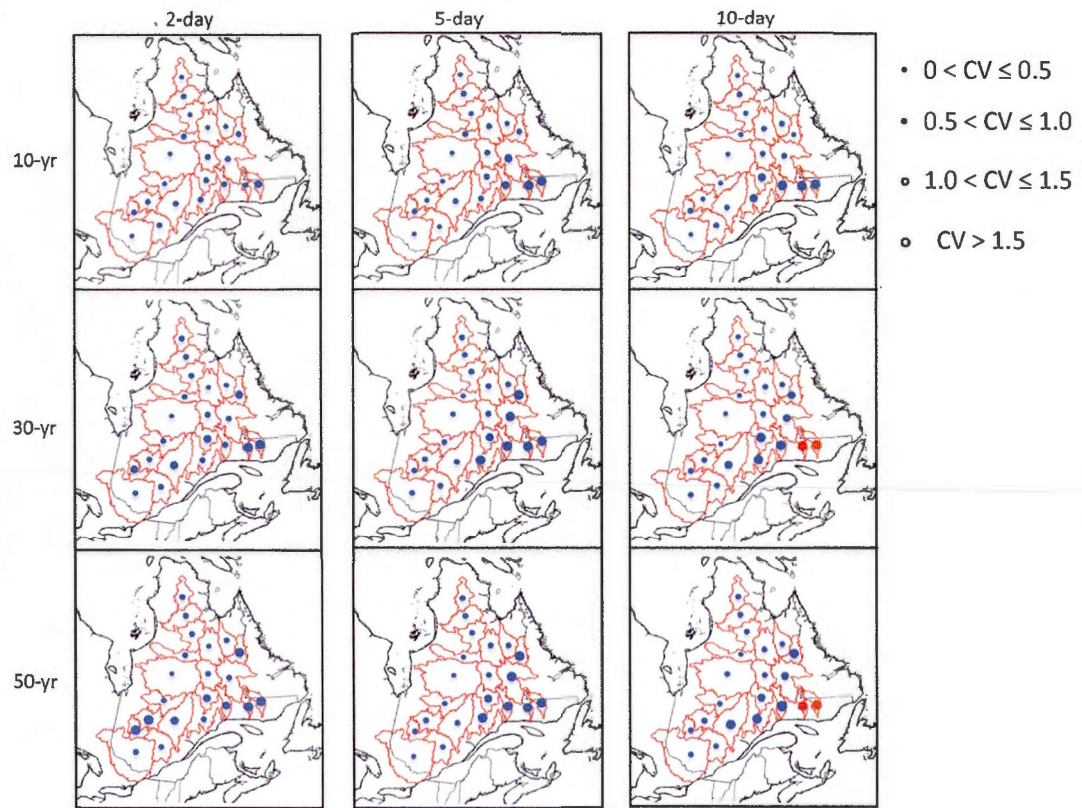


Figure A. 10 : Coefficient of variation of projected changes to 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes based on the multi-RCM ensemble. Blue (red) dots are used for watersheds with positive (negative) projected ensemble averaged changes.

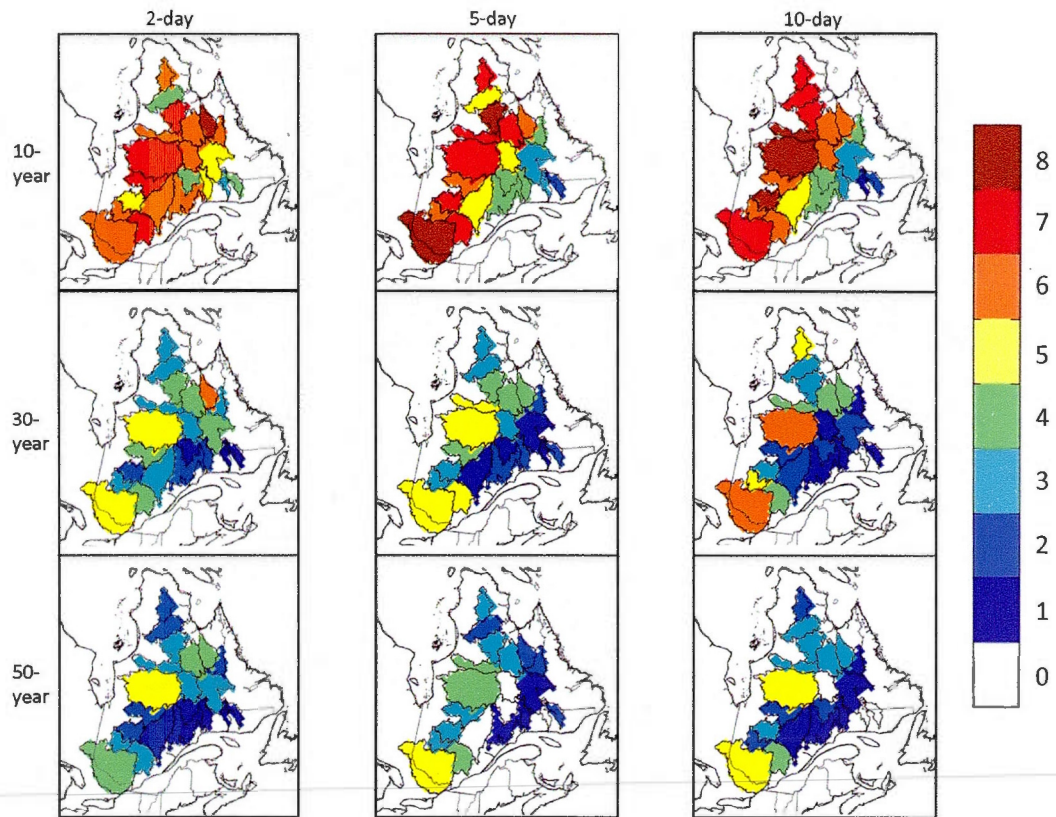


Figure A. 11 : Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 5% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.

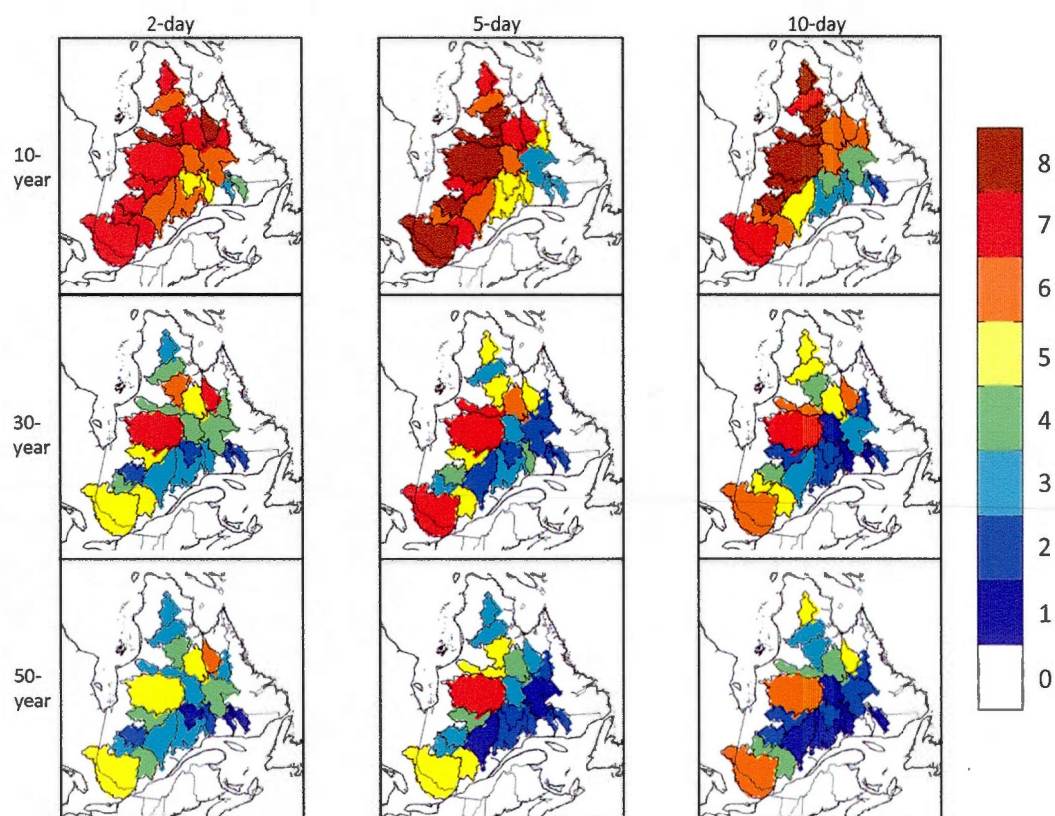


Figure A. 12 : Number of AOGCM/RCM simulation pairs (out of eight) that predict a significant change (at 10% level) for 10-, 30- and 50-yr regional return levels of 2-, 5- and 10-day precipitation extremes.

ANNEXE B

TABLEAUX SUPPLÉMENTAIRES N'AYANT PAS ÉTÉ PRÉSENTÉS DANS L'ARTICLE, MAIS DISCUTÉS DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT

B.1 Sous-section 2.4.1 Statistical homogeneity analysis

Table B. 1 : Best fitting rank of the five distributions using observed dataset (14 watersheds)

Rank Dist.	1	2	3	4	5
GEV	5	6	2	1	0
GNO	3	3	8	0	0
GLO	4	2	0	5	3
PE3	2	3	3	6	0
GPA	0	0	1	2	11

RÉFÉRENCES

- Alley, R. B. et al. (2007), Summary for policymakers, in Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., pp. 1-18, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Beniston, M., D. B. Stephenson, O. B. Christenson, C. A. T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, and K. Woth (2007), Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections, *Climatic Change*, 81, 71–95.
- Brown, R.D. (2010), Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005, *Hydrol. Process.*, 24(14), 1929-1954.
- Christensen, JH., and OB. Christensen (2003), Severe summertime flooding in Europe, *Nature* 421, 805–806.
- Christensen, JH, M. Rummukainen, and G. Lenderink (2009) Formulation of very-high-resolution regional climate model ensembles for Europe, *In: van der Linden P. and J.F.B. Mitchell (eds.) (2009), ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, Met Office Hadley Centre, UK., pp. 47-58.
- Christensen, JH., TR. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis (2007a), Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project, *Clim Change* 81:1–6.
- Crétat, J. and B. Pohl, (2011), How physical parameterizations can modulate internal variability in a Regional Climate Model, *J. Atmos. Sci.*, 69, 714-724.
- Davison, A. C., and D. V. Hinkley (1997), Bootstrap methods and their application, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 582 pp.
- de Elía, R., D. Caya, H. Côté, A. Frigon, S. Biner, M. Giguère, D. Paquin, R. Harvey, and D. Plummer (2008), Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate, *Clim. Dyn.*, 30, 113-132. doi:10.1007/s00382-007-0288-z.
- De Sales F., and Y. Xue (2010), Assessing the dynamic downscaling ability over South America using the intensity-scale verification technique, *Int. J. Climatol.*, 31, doi:10.1002/joc.2139.

- Di Luca, A., R. de Elia, and R. Laprise (2011), Potential for added value in precipitation simulated by high resolution nested Regional Climate Models and observations, *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-011-1068-3.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani (1993), An introduction to the bootstrap, *Chapman and Hall, London, UK*. 436 pp.
- Emori, S, and S.J. Brown (2005), Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate, *Geophys. Res. Lett.* 32, L17706, doi:10.11029/2005GL023272.
- Feser, F. (2006), Enhanced detectability of added value in limited-area model results separated into different spatial scales, *Mon. Wea. Rev.* 134, 2180-2190.
- Fowler, H.J., M. Ekström, C.G. Kilsby, and P. D. Jones (2005), New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations, 1: Assessment of control climate, *J. Hydrol.*, 300(1-4), 212-233.
- GREHYS (1996), Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis, *J. Hydrol.*, 186, 63-84.
- Haberlandt, U. (2007), Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for large-scale extreme rainfall event, *J. Hydrol.*, 332, 144-157.
- Heinrich, G., and A. Gobiet (2011), Uncertainty assessment of the reclip: century ensemble. Wegener Center for Climate and Global Change, Institute for Geophysics, Astrophysics, and Meteorology, University of Graz, Austria. Final Report, Part D (available at http://www.unigraz.at/en/igam7www_heinrich_gobiet-2011-wegcreporttoacrp-reclip_climatechangeuncertaintyalps.pdf).
- Hofstra, N., M. New, and C. McSweeney (2010), The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data, *Clim. Dyn.*, 35(5), 841-858.
- Hewitt CD, and DJ. Griggs (2004). Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts, *EOS Transactions AGU*, 85(52): 566, DOI:10.1029/2004EO520005.
- Hosking, J. R. M., and J. R. Wallis, 1997: Regional Frequency Analysis. *Cambridge University Press*, 224 pp.
- Jaeger, E. B., and S. I. Senevirathne (2010), Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model, *Clim. Dyn.*, 36, 1919-1939.
- Khaliq, M. N., T. B. M. J. Ouarda, L. Sushama, and P. Gachon (2009), Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected

- methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *J. Hydrol.*, 368, 117–130.
- Mailhot, A., I. Beauregard, G. Talbot, D. Caya and S. Biner (2012), Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. International, *Journal of Climatology*. doi: 10.1002/joc.2343
- May, W. (2008), Potential future changes in the characteristics of daily precipitation in Europe simulated by the HIRHAM regional climate model, *Climate Dyn.*, 30, 581–603.
- Mearns, L. O., W. J. Gutowski, R. Jones, L.-Y. Leung, S. McGinnis, A. M. B. Nunes, and Y. Qian (2009), A regional climate change assessment program for North America. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 90, 311–312.
- Mladjic, B., L. Sushama, M. N. Khaliq, R. Laprise, D. Caya, and R. Roy (2011), Canadian RCM Projected Changes to Extreme Precipitation Characteristics over Canada, *J. Climate*, 24, 2565–2584.
- Nikulin, G., E. Kjellström, U. Hansson, G. Strandberg, and A. Ullerstig (2011), Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus*, 63 (1), 41–55.
- Poitras, V., L. Sushama, F. Seglenieks, M.N. Khaliq, and E. Soulis (2011), Projected changes to streamflow characteristics over western Canada as simulated by the Canadian RCM, *J Hydromet.* 126, 1395–1413.
- Prömmel, K, B. Geyer, J.M. Jones and M. Widmann (2010), Evaluation of the skill and added value of a reanalysis-driven regional simulation for Alpine temperature, *Int. J. Climatol.* 30:760–773. doi:10.1002/joc.1916
- Seth, A., S. Rauscher, S. Camargo, J-H. Qian, and J. Pal (2007), RegCM regional climatologies for South America using reanalysis and ECHAM model global driving fields, *Clim. Dyn.*, 28, 461–480.
- Tapsoba, D., V. Fortin, F. Anctil, and M. Hache (2005), Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige. Application aux bassins de la rivière Gatineau. *Canadian J. Civil Eng.*, 32(1), 289–297.
- Tebaldi C., J. M. Arblaster, K. Hayhoe, and G. A. Meehl (2006), Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events, *Climatic Change*, 79, 185–211.
- Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons (2003), The changing character of precipitation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 1205–1217.